



Análise térmica de perfis em aço protegidos e não protegidos sob ação do fogo

PEDRO NUNO DA COSTA OLIVEIRA

novembro de 2020

ANÁLISE TÉRMICA DE PERFIS EM AÇO PROTEGIDOS E NÃO PROTEGIDOS SOB AÇÃO DO FOGO

Pedro Nuno da Costa Oliveira

1150555

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE TÉRMICA DE PERFIS EM AÇO PROTEGIDOS E NÃO PROTEGIDOS SOB AÇÃO DO FOGO

Pedro Nuno da Costa Oliveira

1150555

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação da Professora Doutora Elza Maria Morais Fonseca e coorientação do Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho.

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutor Luís Norberto Miranda Torres

Professor adjunto, ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutora Elza Maria Morais Fonseca

Professor adjunto, ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

Coorientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor adjunto, ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutor Carlos Jorge da Rocha Balsa

Professor Adjunto, IPB – Instituto Politécnico de Bragança

AGRADECIMENTOS

À minha família especialmente aos meus pais e avós, aos primeiros, Adão Oliveira e Maria Costa, pelo apoio incondicional, pelos bons valores transmitidos e esforço pessoal que proporcionaram um ambiente adequado ao meu desenvolvimento enquanto pessoa e estudante, aos meus avós, Armando Costa e Melânia Viera, por todo o amor e sábios conhecimentos que me foram transmitidos ao longo do meu crescimento, é também vosso este trabalho.

À minha orientadora, Professora Doutora Elza Fonseca, pela qual tenho muito carinho e admiração, pelo seu apoio e disponibilidade, pois foram totais, e ao mesmo tempo por me deixar trabalhar de forma autónoma e aprender com os meus erros. Por partilhar os seus conhecimentos, por ter acompanhado de perto todo o processo e pelas suas sugestões e recomendações que contribuíram em grande parte para esta dissertação aqui apresentada. Por ser a excelente profissional que é, enquanto professora e por contagiar com o seu entusiasmo pela engenharia mecânica.

Ao meu coorientador, Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pelo qual tenho muita admiração, pelas suas sugestões, apoio e disponibilidade durante a realização desta dissertação. Por partilhar os seus sábios conhecimentos e pelo excelente professor que é.

À Mariana Vasconcelos, de uma forma especial, pelo apoio e compressão que se espera de uma companheira, contribui para a elaboração desta dissertação com as suas sugestões e críticas.

À minha irmã, Melânia Oliveira, ao meu cunhado, Rui Silva, e ao meu sobrinho, Vicente Silva, por todo o apoio e carinho e ajuda que me proporcionaram, não só durante o percurso académicos, mas também ao longo da minha vida.

PALAVRAS CHAVE

Análise térmica; perfis em aço; Eurocódigos; curvas de incêndio; fator de massividade

RESUMO

A construção em aço ocupa um lugar de destaque na construção de edifícios, no entanto, o aço é um material que quando submetido a um incêndio apresenta um comportamento negativo, uma vez que existe uma degradação progressiva das suas propriedades mecânicas, existindo uma probabilidade elevada de ocorrer o colapso prematuro da estrutura. Assim sendo, é fundamental existir um controlo e prevenção do incêndio, como por exemplo, pela utilização de placas de gesso de forma a reduzir o aquecimento dos perfis.

Com base em modelos analíticos ou numéricos, é possível analisar a evolução da temperatura na secção transversal dos perfis em aço quando submetidos a cenários de incêndio.

O objetivo principal deste trabalho consistiu na análise da evolução da temperatura na secção transversal de diferentes perfis em aço, protegidos por placas de gesso do tipo F e não protegidos, submetidos à ação do fogo.

Para a determinação das curvas de evolução de temperatura foram utilizadas metodologias analíticas (Método Simplificado do Eurocódigo 3 - Parte 1-2 e o Método da Capacitância Global) e modelos numéricos (Método de Elementos Finitos).

Foram estudados 44 perfis diferentes das gamas IPE, HEM, L e UAP sujeitos à ação do fogo segundo as curvas de incêndio nominais ISO 834, de Elementos Exteriores e de Hidrocarbonetos, tendo-se realizado um total de 396 análises térmicas para perfis não protegidos e 132 para perfis protegidos.

Inicialmente, realizaram-se análises térmicas dos perfis não protegidos através dos dois métodos analíticos, com o intuito de identificar as diferenças entre os dois métodos. Seguidamente, utilizou-se o método numérico para realizar análises térmicas aos mesmos perfis para estudar a validade dos métodos analíticos no que diz respeito à consideração de uma distribuição de temperaturas constante na secção transversal dos perfis não protegidos.

Para formular conclusões relativas ao benefício da utilização dos painéis de gesso como proteção, realizaram-se análises térmicas para os mesmos perfis protegidos com placas de gesso, com uma espessura de 20 mm, através do método numérico.

De forma geral, os dois métodos analíticos utilizados são concordantes e o desenvolvimento das temperaturas na secção transversal dos perfis não protegidos diminuiu com a diminuição do fator de massividade dos perfis. No entanto, os gradientes térmicos na secção transversal do perfil aumentaram com o aumento do tamanho dos mesmos.

A utilização de placas de gesso mostrou ser uma boa solução na proteção contra incêndios, diminuindo drasticamente as temperaturas na secção transversal do perfil. Para os perfis protegidos, o desenvolvimento de temperaturas na secção transversal diminuiu com o aumento do tamanho de perfil.

KEYWORDS

Thermal analysis; steel profiles; Eurocodes; fire curves; section factor

ABSTRACT

The steel construction takes a prominent place in the building construction, however, steel is a material that when submitted to fire presents a negative behaviour, because there is a progressive degradation of its mechanical properties, with high probability of premature collapse. Therefore, it is essential to have fire control and prevention, such as, for example, by use of gypsum plasterboard to protect the steel profiles.

Based on analytical models, provided by current standards, or by numerical models, it is possible to analyse the temperature evolution in the cross section of steel profiles when subjected to fire scenarios.

The aim of this study was to analyse the temperature evolution in the cross section of different steel profiles, protected by gypsum plasterboard type F and unprotected, submitted to the fire action.

Analytical methodologies were used to determine the temperature evolution (Eurocode 3 Part 1-2 with the Simplified Method and Lumped Capacitance Method) and numerical models (using the finite element method).

44 different profiles (from IPE, HEM, L and UAP ranges) were studied subject to the fire action according to the nominal fire curves ISO 834, External Elements and Hydrocarbon fire curve, having carried out a total of 396 thermal analyses for unprotected profiles and 132 for protected profiles.

Initially, thermal analysis of the unprotected profiles was performed using the two analytical methods, to identify the differences between them. Then, the numerical method was used to perform thermal analysis on the same profiles to study the validity of the analytical methods, regarding the consideration of a constant temperature distribution in the cross section of the unprotected profiles.

To evaluate the benefit of using gypsum plasterboard as protection, thermal analysis was carried out for the same profiles protected with 20 mm thick, using the numerical method.

In summary, the two analytical methods are consistent and the development of temperatures in the cross section of the unprotected profiles decreased with the decrease in the mass factor of the profiles. However, the thermal gradients in the cross section increased with the increase of the section size of the profiles.

The use of gypsum plasterboard proved to be a good solution in the protection against fire, drastically reducing the temperatures in the cross section of the profile. For protected profiles, the development of temperatures in the cross section decreases with increasing profile size.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
TGA	Análise Termogravimétrica
APDL	<i>ANSYS® Parametric Design Language</i>
BSI	<i>British Standard Instituion</i>
d.C	Depois de Cristo
ECCS	<i>European Commission for Constructional Steelwork</i>
ENV	<i>European Pre-Standard</i>
EN	<i>European Standard</i>
LSF	<i>Light Steel Frame</i>
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método de Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
BS	Norma Inglesa
ISO	Norma Internacional
Bi	Número de Biot
Fo	Número de Fourier
LVDT	Transdutores Lineares

Lista de Unidades

g	Grama
°C	Graus celsius
J	Joule
K	Kelvin
m	Metro
N	Newton
Pa	Pascal
min	Minuto
s	Segundo
W	Watt

Lista de Símbolos

A	Área
A_m	Área da superfície do elemento por unidade de comprimento
C_p	Calor específico
C_a	Calor específico do aço
h_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção
h_{cr}	Coeficiente de transferência de calor por convecção e radiação
h_r	Coeficiente de transferência de calor por radiação
L	Comprimento
L_c	Comprimento característico
λ_a	Condutibilidade do aço
λ	Condutibilidade térmica
σ	Constante de Stefan-Boltzman
α	Difusibilidade térmica
ε	Emissividade
ε_m	Emissividade da superfície do elemento estrutural
ε_f	Emissividade do incêndio
k_{sh}	Fator adimensional de correção para o efeito de sombra
Φ	Fator de Vista
q	Fluxo de calor
$\dot{h}_{net,c}$	Fluxo de calor efetivo por convecção por unidade de área
$\dot{h}_{net,r}$	Fluxo de calor efetivo por radiação por unidade de área
$\dot{h}_{net,d}$	Fluxo de calor efetivo por unidade de área
N_i	Funções de forma
Δt	Intervalo de tempo
ρ	Massa volúmica
%	Porcentagem
P	Perímetro
Q	Quantidade de calor
\dot{Q}	Quantidade de calor gerado
θ_m	Temperatura da superfície do elemento estrutural
θ_r	Temperatura de radiação efetiva na envolvente do elemento
θ_a	Temperatura do aço
θ_g	Temperatura dos gases no compartimento do incêndio
t	Tempo decorrido do incêndio
V	Volume

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Calor específico do aço em função da temperatura	46
Figura 2.2 - Condutibilidade térmica do aço em função da temperatura.....	47
Figura 2.3 - Difusibilidade térmica do aço em função da temperatura	48
Figura 2.4 - Exemplos de painéis de gesso. a) Painel de gesso básico para proteção ao fogo [40] e b) Painéis de gesso com diferentes formas e cores para preencher critérios estéticos [41].	49
Figura 2.5 - Massa volúmica do gesso tipo F em função da temperatura	51
Figura 2.6 - Calor específico do gesso tipo F em função da temperatura.....	52
Figura 2.7 - Condutibilidade térmica do gesso tipo F em função da temperatura	53
Figura 2.8 - Difusibilidade térmica do gesso tipo F em função da temperatura.....	53
Figura 2.9 - Proteção passiva de perfis em aço. a) Perfil protegido em caixão e b) Vigas e colunas protegidas com placas de gesso [48]	54
Figura 2.10 - Massa volúmica do ar em função da temperatura	55
Figura 2.11 - Calor específico do ar em função da temperatura.....	55
Figura 2.12 - Condutibilidade térmica do ar em função da temperatura	56
Figura 2.13 - Difusibilidade térmica do ar em função da temperatura.....	56
Figura 3.1 - Condução através de um sólido ou um fluido estacionário.....	59
Figura 3.2 - Convecção de uma superfície para um fluido em movimento	61
Figura 3.3 - Trocas de calor por radiação entre duas superfícies	62
Figura 4.1 - Edifícios com elementos estruturais exteriores. a) Hotel Arts em Barcelona [55] e b) Edifício IADE em Lisboa [56]	68
Figura 4.2 - Evolução da curva nominal de incêndio para Elementos Exteriores	68
Figura 4.3 - Evolução gráfica da curva nominal de incêndio ISO 834.....	69
Figura 4.4 - Incêndio do <i>World Trade Center</i> . a) Início do Incêndio [59] e b) Colapso das torres [59].	70
Figura 4.5 - Evolução gráfica da curva nominal de incêndio de hidrocarbonetos	70
Figura 5.1 – Dimensões dos perfis em aço selecionados [62]. a) IPE/HEM, b) L e c) UAP	76

Figura 5.2 - Erro da variação do intervalo de tempo para o Método Simplificado para um perfil de aço IPE 400	80
Figura 5.3 - Número de Biot para perfis em aço em função do aumento da temperatura de incêndio	83
Figura 5.4 - Erro da variação do intervalo de tempo para o Método da Capacitância Global em função do tempo para um perfil de aço IPE 400	84
Figura 5.5 - Elemento Plane77 de 8 nós [81].....	94
Figura 5.6 - Exemplo de malha aplicada aos perfis em aço. a) IPE 100, b) HEM 100, c) L 100x100x8 e d) UAP 80.....	96
Figura 5.7 - Pontos nodais estudados para cada perfil. a) IPE/HEM, b) L e c) UAP.....	97
Figura 6.1 – Diferentes disposições de proteção de perfis metálicos [34]: a) Ao longo do contorno do perfil e b) Em caixão	102
Figura 6.2 - Frentes de fogo no perfil IPE 100 protegido com malha de elementos ...	103
Figura 6.3 - Simplificação de 1/4 do perfil IPE 100 protegidos	103
Figura 6.4 - Frentes de fogo no perfil UAP 80 protegido com malhas de elementos..	104
Figura 6.5 - Simplificação do perfil UAP 80	104
Figura 6.6 - Exemplos de elementos estruturais que contêm vazios internos	105
Figura 6.7 - IPE 100 s/ modelação de ar nas cavidades.....	105
Figura 6.8 - IPE 100 c/ ar modelado nas cavidade.....	105
Figura 6.9 - Resultados numéricos de temperatura [°C] para uma exposição ao fogo de 60 minutos. a) IPE 100 sem malha de ar nas cavidades e b) IPE 100 com malha de ar nas cavidades	106
Figura 6.10 - Temperatura em função do tempo para o perfil IPE 100 sem ar e com ar modelado nas cavidades	106
Figura 7.1 – Temperatura dos perfis IPE expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3.....	110
Figura 7.2 – Temperatura dos perfis IPE expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3	110

Figura 7.3 - Temperatura dos perfis IPE expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3	111
Figura 7.4 - Erro Relativo dos resultados obtidos através do Método de Capacitância Global em relação ao Método do EC3.....	111
Figura 7.5 – Erro relativo para o perfil IPE 100 em função do tempo de aquecimento	111
Figura 7.6 - Temperatura dos perfis HEM expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3.....	112
Figura 7.7 - Fator de massividade dos perfis HEM	113
Figura 7.8 - Temperatura dos perfis HEM expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3	113
Figura 7.9 - Temperatura dos perfis HEM expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3	114
Figura 7.10 - Temperatura dos perfis L expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3.....	114
Figura 7.11 - Temperatura dos perfis L expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3	115
Figura 7.12 - Temperatura dos perfis L expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3	115
Figura 7.13 - Temperatura dos perfis UAP expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3.....	116
Figura 7.14 - Temperatura dos perfis UAP expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3	116
Figura 7.15 - Temperatura dos perfis UAP expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3	117

Figura 7.16 - Temperatura dos perfis IPE 100 e IPE 600 expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre a utilização das propriedades térmicas não lineares e das propriedades contantes	117
Figura 7.17 - Temperatura dos perfis IPE expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3	119
Figura 7.18 - Temperatura dos perfis IPE expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3	120
Figura 7.19 - Temperatura dos perfis IPE expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3.....	120
Figura 7.20 – Comparação da evolução de temperaturas entre a média dos três pontos nodais e o método do Eurocódigo 3	121
Figura 7.21 - Temperatura dos perfis HEM expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3	122
Figura 7.22 - Temperatura dos perfis HEM expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3	122
Figura 7.23 - Temperatura dos perfis HEM expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3.....	123
Figura 7.24 - Temperatura dos perfis L expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3	124
Figura 7.25 - Temperatura dos perfis L expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3	125
Figura 7.26 - Temperatura dos perfis L expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3.....	125
Figura 7.27 - Temperatura dos perfis UAP expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3	126

Figura 7.28 - Temperatura dos perfis UAP expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3	127
Figura 7.29 - Temperatura dos perfis UAP expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3.....	127
Figura 7.30 - Temperatura dos perfis IPE protegidos expostos à curva de incêndio nominal ISO 834.....	129
Figura 7.31 - Temperatura dos perfis IPE protegidos expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores.....	129
Figura 7.32 - Temperatura dos perfis IPE protegidos expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos.....	130
Figura 7.33 - Temperatura dos perfis HEM protegidos expostos à curva de incêndio nominal ISO 834.....	131
Figura 7.34 - Temperatura dos perfis HEM protegidos expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores.....	131
Figura 7.35 - Temperatura dos perfis HEM protegidos expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos.....	132
Figura 7.36 – Variação da temperatura máxima na secção transversal dos perfis HEM	133
Figura 7.37 - Temperatura dos perfis L protegidos expostos à curva de incêndio nominal ISO 834.....	134
Figura 7.38 -Temperatura dos perfis L protegidos expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores.....	134
Figura 7.39 - Temperatura dos perfis L protegidos expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos.....	135
Figura 7.40 - Variação da temperatura máxima na secção transversal dos perfis L....	135
Figura 7.41 - Temperatura dos perfis UAP protegidos expostos à curva de incêndio nominal ISO 834.....	136
Figura 7.42 - Temperatura dos perfis UAP protegidos expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores.....	137
Figura 7.43 - Temperatura dos perfis UAP protegidos expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos.....	137

Figura 7.44 - Variação da temperatura máxima na secção transversal dos perfis UAP	138
Figura 7.45 - Temperatura do perfil IPE 100 exposto à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre a utilização das propriedades térmicas não lineares e das propriedades contantes	138
Figura 10.1 - Ábaco para dimensionamento de elementos estruturais de aço sujeitos a curva ISO 834	322
Figura 10.2 - Ábaco para dimensionamento de elementos estruturais de aço sujeitos a curva de Elementos Exteriores	322
Figura 10.3 - Ábaco para dimensionamento de elementos estruturais de aço sujeitos a curva de Hidrocarbonetos	323

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Variação do calor específico do aço em função da temperatura [34]	46
Tabela 2.2 - Variação da condutibilidade térmica do aço em função da temperatura [34]	47
Tabela 2.3 - Tipos de gesso e as suas características	50
Tabela 2.4 - Propriedades térmicas constantes preconizadas pelo Comité Técnico Europeu (ECCS) [47].....	54
Tabela 5.1 - Fórmulas para cálculo do fator de massividade de acordo com o Eurocódigo 3 - Parte 1-2 [34].....	75
Tabela 5.2 - Fórmulas para cálculo do fator de massividade de acordo com o Eurocódigo 3 - Parte 1-2 [33] (continuação)	76
Tabela 5.3 - Equações para o cálculo do fator de massividade dos perfis estudados ...	77
Tabela 5.4 - Expressões para o cálculo do fator de correção para o efeito de sombra .	78
Tabela 5.5 - Coeficientes de transferência de calor por convecção [54]	79
Tabela 5.6 - Funções de Forma de cada nó do elemento <i>PLANE77</i>	95
Tabela 6.1 - Temperaturas críticas para elementos estruturais em aço sujeitos à ação do fogo [83]	102
Tabela 10.1 - Valores de fator de massividade e comprimento característico dos perfis IPE	159
Tabela 10.2 - Valores de fator de massividade e comprimento característico dos perfis HEM	160
Tabela 10.3 - Valores de fator de massividade e comprimento característico dos perfis L	160
Tabela 10.4 - Valores de fator de massividade e comprimento característico dos perfis UAP	161
Tabela 10.5 - Código APDL para as diferentes curvas de incêndio nominal	324

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	Considerações Gerais	29
1.2	Motivação	31
1.3	Objetivos	32
1.4	Metodologia	33
1.5	Descrição dos Capítulos	33
1.6	Estado da Arte	35
2	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	45
2.1	Aço.....	45
2.1.1	Calor Específico	46
2.1.2	Condutibilidade Térmica	47
2.1.3	Difusibilidade Térmica	48
2.2	Gesso	48
2.2.1	Tipos de Gesso.....	49
2.2.2	Propriedades Térmicas do Gesso	50
2.2.2.1	Massa Volúmica	51
2.2.2.2	Calor Específico	52
2.2.2.3	Condutibilidade Térmica	52
2.2.2.4	Difusibilidade térmica	53
2.3	Ar	54
3	MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	59
3.1	Transferência de Calor por Condução.....	59
3.2	Transferência de Calor por Convecção	61

3.3	Transferência de Calor por Radiação	62
4	CURVAS DE INCÊNDIO NOMINAIS	67
4.1	Curva de Incêndio para Elementos Exteriores	68
4.2	Curva de Incêndio Padrão ISO 834	69
4.3	Curva de Incêndio de Hidrocarbonetos	69
5	PERFIS EM AÇO NÃO PROTEGIDOS	73
5.1	Método Simplificado Proposto pelo Eurocódigo 3	74
5.2	Método da Capacitância Global	80
5.3	Método de Cálculo Avançado	85
5.3.1	Método de Elementos Finitos	86
5.3.2	Equação Diferencial de Condução de Calor e Condições Fronteira	86
5.3.3	Método dos Resíduos Pesados	87
5.3.4	Método de Elementos Finitos Aplicado à Equação de Condução de Calor	89
5.3.5	Discretização da Equação de Condução de Calor no Espaço	90
5.3.6	Discretização da Equação de Condução de Calor no Tempo	92
5.3.7	Processo Iterativo para Problemas de Transferência de Calor Não Lineares	93
5.3.8	Modelo Numérico no ANSYS®	94
6	PERFIS EM AÇO PROTEGIDOS	101
6.1	Modelo Numérico no ANSYS®	101
6.2	Vazios Internos	104
7	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	109
7.1	Perfis em Aço Não Protegidos	109
7.1.1	Métodos Analíticos	109
7.1.2	Método de Cálculo Avançado	118

7.2	Perfis em Aço Protegidos	128
8	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	143
8.1	Conclusões	143
8.2	Proposta de Trabalhos Futuros	145
9	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	149
10	ANEXOS.....	159
10.1	Anexo 1.....	159
10.2	Anexo 2.....	162
10.3	Anexo 3.....	322
10.4	Anexo 4.....	324

INTRODUÇÃO

- 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS
- 1.2 MOTIVAÇÃO
- 1.3 OBJETIVOS
- 1.4 METODOLOGIA
- 1.5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS
- 1.6 ESTADO DA ARTE

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O incêndio é considerado um fenómeno de elevada gravidade e complexidade, pois é imprevisível e pode provocar consequências desastrosas, tais como perdas materiais e, ainda mais gravoso, perdas de vidas humanas e animais, caso não seja controlado em tempo útil. Por isso, o controlo e a prevenção de um incêndio são um tema que carece de uma atenção especial por parte da Engenharia e de todas as autoridades e instituições envolvidas. Como exemplo mediático dos efeitos desastrosos provocados por este fenómeno, têm-se o acidente ocorrido com o embate de dois aviões nas torres do *World Trade Center* em Nova York, no dia 11 de setembro de 2001, que levou à perda de quase três milhares de vidas humanas e à queda de ambos os edifícios [1-2].

Até há relativamente pouco tempo, as medidas de proteção contra incêndio em edifícios possuíam como base procedimentos que foram criados para dar resposta a desastres ocorridos anteriormente [3]. Atualmente, a engenharia de segurança contra incêndios é bastante complexa e a utilização de novos métodos tem vindo a beneficiar a segurança das estruturas e dos seus ocupantes.

É notório que a construção em aço tem vindo a ganhar grande destaque na indústria de construção, já que apresenta diversas vantagens quando comparado com outros materiais de construção. Em comparação com o betão armado, que é o material constituinte de grande parte das estruturas existentes em Portugal, o aço possui vantagens como melhor rácio resistência/peso, maior ductilidade resistindo melhor a um sismo, é um material reciclável e possibilita uma construção precisa e rápida [4].

No entanto, as estruturas em aço constituem um problema para a engenharia de segurança contra incêndios, já que este material quando sujeito a elevadas temperaturas perde a sua resistência mecânica devido à degradação progressiva das suas propriedades [5]. Deste modo, pode existir uma elevada probabilidade de ocorrer um colapso prematuro de um dado elemento estrutural, ou até mesmo de toda a estrutura, sem que seja possível garantir totalmente a evacuação do edifício. Os Eurocódigos [6], utilizados na Europa, os *International Building Codes*, utilizados nos Estados Unidos e as Normas Brasileiras admitem a utilização de uma vasta gama de regras e procedimentos simplificados para a garantia da segurança humana perante uma situação de incêndio neste tipo de estruturas.

Grande parte destes procedimentos simplificados, fornecidos por esses regulamentos e códigos normativos, são baseados em resultados obtidos em ensaios em fornos de elementos isolados, o que representa uma abordagem prescritiva e conservadora no dimensionamento de estruturas. No entanto, a comunidade científica, e consequentemente a regulamentação de segurança, tem-se focado na análise do desempenho estrutural dos elementos construtivos expostos a situações de incêndios reais, incrementando soluções que produzam melhor adequação, como a utilização de métodos de cálculo avançado [7].

Os Eurocódigos, atualmente em vigor em Portugal, admitem uma abordagem prescritiva ou baseada no desempenho estrutural. Uma abordagem prescritiva é baseada no cálculo da temperatura do material, denominada de “temperatura crítica”, isto é, a temperatura em que o elemento entra em colapso, quando é submetido a uma curva de incêndio normalizada (curva de fogo “temperatura-tempo”). Deste modo, esta abordagem é simplesmente focada na avaliação da temperatura do material que constitui o elemento, não sendo consideradas circunstâncias fundamentais, como por exemplo, o tipo de incêndio e as consequências da exposição ao fogo. Já numa abordagem baseada no desempenho estrutural são considerados todos os fatores, sendo que a temperatura a que se encontra o material é apenas uma das variáveis a considerar. Estes procedimentos, apesar da sua complexidade, permitem a obtenção de resultados mais representativos do que se verifica quando uma estrutura é submetida a situações reais de incêndio [5].

Nos cálculos de resistência de uma estrutura submetida ao fogo, o cálculo do perfil de temperaturas desenvolvido na secção transversal do elemento estrutural, em função do tempo, é denominado de análise térmica. Esta análise é sempre necessária para a realização de uma análise estrutural, uma vez que qualquer discrepância no cálculo do campo de temperaturas na secção transversal do elemento pode induzir à seleção de um tamanho de secção incorreto do elemento estrutural ou a uma diminuição/aumento da espessura necessária de proteção contra incêndio [3,5]. A análise térmica pode ser efetuada através de ensaios experimentais, métodos analíticos simplificados ou métodos numéricos.

A análise térmica por ensaios experimentais é economicamente dispendiosa, uma vez que para a sua realização são necessários fornos de grandes dimensões, equipamentos tecnológicos de alta precisão e provetes. São realizados ensaios experimentais, principalmente, para pesquisas e dimensionamentos de materiais de proteção contra incêndios em estruturas em aço. Os resultados destes tipos de ensaios são bastante interessantes uma vez que fornecem parâmetros de entrada e de comparação para a validação de métodos teóricos e numéricos. Os resultados obtidos são tanto mais precisos quanto mais próximo da realidade for o modelo de teste adotado.

Os métodos simplificados são essencialmente equações propostas por normas que, apesar de garantirem a segurança da estrutura por serem conservativos, muitas vezes não garantem a economia do projeto. Partindo de uma curva de incêndio “temperatura-tempo”, é possível determinar a temperatura na secção transversal do elemento estrutural, considerando-a constante em toda a secção, com base nas equações fundamentais da transferência de calor. Estas equações podem ser utilizadas para uma análise térmica de elementos com ou sem proteção e os conceitos de fator de massividade, temperatura crítica e tipo de proteção assumem elevada importância.

Por último, os métodos numéricos são mais complexos do que os métodos simplificados, baseiam-se no método de elementos finitos (MEF) e necessitam de meios computacionais. Estes métodos fornecem resultados bastante precisos e fidedignos, revelando-se uma ferramenta bastante útil e importante na área da investigação. No entanto, podem ser pouco práticos uma vez que a modelação numérica detalhada da análise térmica é bastante complexa. Além disso, os resultados obtidos pelos métodos numéricos são sensíveis aos parâmetros numéricos necessários, como por exemplo o incremento de tempo ou o tamanho da malha do elemento [9].

De seguida, é apresentada a motivação para a escolha do tema em questão, os objetivos deste trabalho, a metodologia utilizada, uma breve descrição de cada capítulo abordado e a investigação científica executada nesta área.

1.2 MOTIVAÇÃO

O aço, quando submetido a temperaturas elevadas, vê a sua resistência mecânica diminuir significativamente, pois o aumento da temperatura provoca uma grande redução do seu módulo de elasticidade e da sua tensão de cedência, o que pode provocar o colapso prematuro de um dado elemento estrutural ou até mesmo de toda a estrutura, podendo não garantir a evacuação total do edifício. Por este motivo, considera-se que a resistência ao fogo do aço é baixa.

A construção em aço estrutural tem revelado um enorme crescimento a nível mundial e, neste contexto, a Engenharia Mecânica assume um grande interesse na análise de este tipo de estruturas sob a ação do fogo, inicialmente através de ensaios experimentais em fornos e, atualmente, através de métodos numéricos e métodos simplificados, com o surgimento de regulamentação normativa por todo o mundo. Destas normas, é de salientar os Eurocódigos, adotados na Europa, e que servirão como base para esta dissertação.

A utilização dos métodos simplificados tem vindo a tornar-se uma prática recorrente por engenheiros e projetistas, pois estes produzem resultados satisfatórios e de fácil utilização e compreensão.

No entanto, estes métodos são conservativos e pressupõem simplificações, como é o caso da distribuição de temperaturas uniforme ao longo da secção transversal do elemento estrutural e da propagação uniforme de temperatura no ambiente de incêndio.

Deste modo, é do máximo interesse perceber se existe conformidade dos métodos simplificados relativamente à realidade, quer recorrendo a ensaios experimentais, quer através de modelos numéricos, como no caso da presente dissertação. Também existe a necessidade da criação de uma base de dados sobre a resistência ao fogo dos elementos estruturais em aço de fácil interpretação para que o trabalho dos engenheiros e projetistas seja facilitado, quando presentes a uma situação de dimensionamento de estruturas em aço sob a ação do fogo.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho prende-se com o estudo da evolução da temperatura nas secções transversais de perfis em aço submetidos à ação do fogo. Serão considerados perfis protegidos com placas de gesso e não protegidos das gamas IPE, HEM, L e UAP.

Pretende-se realizar análises térmicas a estes perfis através do Método Simplificado preconizado pelo Eurocódigo 3 e comparar os seus resultados com Método da Capacitância Global, de forma a averiguar a validade deste para a utilização no protejo de elementos estruturais não protegidos em aço submetidos a um cenário de incêndio. Pretende-se ainda comparar os resultados dos métodos analíticos com o numérico, executado no programa *ANSYS® Academic Student R3*, com o intuito de compreender as limitações dos métodos analíticos, bem como determinar a influência das diferentes geometrias dos perfis na sua resistência ao fogo.

Para os perfis protegidos, tenciona-se interpretar o benefício da utilização de placas de gesso como proteção passiva na resistência ao fogo dos diferentes perfis em aço quando submetidos às diferentes curvas de incêndio nominais, através do método numérico no programa *ANSYS® Academic Student R3*.

Como objetivo final, pretende-se desenvolver fichas técnicas de resistência ao fogo para os perfis estudados de fácil consulta e úteis no projeto de construções em aço, que possibilitem aos engenheiros e projetistas o dimensionamento rápido e eficaz dos elementos estruturais. Pretende-se ainda elaborar ábacos que permitam a consulta

rápida da evolução da temperatura em função dos fatores de massividade dos perfis para as diferentes curvas de incêndio nominais.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia adotada para atingir os objetivos propostos anteriormente foi a seguinte:

- Realização de uma pesquisa bibliográfica sobre o tema da dissertação de modo a obter o maior conhecimento possível sobre o tema com trabalhos de outros autores.
- Estudo das propriedades térmicas do aço, do gesso e do ar, que são imprescindíveis para a realização da análise térmica, quer por métodos simplificados, quer por métodos numéricos.
- Estudo das curvas normalizadas de incêndio bem como os fenômenos de transferência de calor envolvidos num incêndio.
- Estudo de dois tipos de métodos simplificados para diferentes curvas de incêndio normalizadas: Método da Capacitância Global e Método Simplificado proposto pelo Eurocódigo 3 - Parte 1-2. Obter o perfil de temperaturas em função do tempo na secção transversal para diferentes gamas de perfis em aço não protegidos. Comparar os resultados obtidos pelos dois métodos.
- Realização de análises térmicas por métodos numéricos através do programa de elementos finitos *ANSYS® Academic Student R3*, de forma a obter perfis de temperatura em função do tempo em diferentes pontos dos perfis para as gamas de perfis protegidos e não protegidos.
- Comparação dos resultados obtidos através dos métodos simplificados com os resultados obtidos pelo método numérico.
- Elaboração de fichas técnicas para cada perfil em aço estudado sobre a sua resistência ao fogo.

1.5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Nesta dissertação foram abordados os temas pela seguinte ordem: introdução, propriedades térmicas dos materiais, mecanismos de transferência de calor, curvas de incêndio nominais, perfis em aço não protegidos, perfis em aço protegidos, discussão de resultados e conclusões e propostas de trabalhos futuros.

No presente capítulo, realizou-se uma introdução ao tema, apresentou-se a motivação, definiram-se os objetivos do trabalho e a metodologia adotada para a consolidação desses objetivos. Por último, no estado da arte foi feita uma breve introdução histórica acerca dos primeiros desastres causados por incêndios, dos primeiros estudos e normas

sobre a resistência dos materiais ao fogo, tendo sido abordado de seguida a principal investigação científica elaborada no âmbito de análises térmicas de perfis e estruturas em aço, protegidas e não protegidas, expostas ao fogo.

No capítulo 2, propriedades térmicas dos materiais, foram apresentadas as propriedades térmicas do aço, do gesso e do ar, necessárias para a realização de análises térmicas dos perfis protegidos e não protegidos sujeitos à ação do fogo.

No capítulo 3, mecanismos de transferência de calor, foi realizada uma revisão sobre os fenómenos de transferência de calor envolvidos na transmissão de calor durante um incêndio, tendo sido apresentadas as equações que regem esses fenómenos.

No capítulo 4, curvas de incêndio nominais, foram apresentados os cenários de incêndio de acordo com a curva ISO 834, de Elementos Exteriores e de Hidrocarbonetos. Foram também apresentadas as equações que regem essas curvas.

No capítulo 5, perfis em aço não protegidos, são descritos os métodos utilizados para a realização das análises térmicas dos perfis não protegidos. Inicialmente, este capítulo prende-se com a apresentação pormenorizada do procedimento de cálculo relativo ao Método Simplificado do Eurocódigo 3 e do Método da Capacitância Global. Posteriormente, é descrito o método numérico baseado no MEF, utilizado no programa computacional *ANSYS® Academic Student R3*. É apresentada a formulação MEF através de equações diferenciais da condução de calor discretizada no espaço e tempo, bem como os processos iterativos para a resolução não linear. De seguida, são sintetizadas todas as considerações efetuadas no modelo numérico, como o tipo de elementos finitos utilizados, as dimensões da malha, as condições de fronteira a adotar e os perfis estudados.

No capítulo 6, perfis em aço protegidos, é realizada uma breve apresentação sobre as diferentes disposições de proteção e métodos de cálculo da espessura. Seguidamente, são abordadas todas as considerações efetuadas no modelo numérico no *ANSYS® Academic Student R3*. É ainda realizado um estudo comparativo sobre a modelação do ar nos vazios internos formados pela utilização da proteção.

No capítulo 7, discussão de resultados, foram analisados e discutidos os resultados obtidos através dos métodos analíticos e numéricos. As análises foram separadas em duas partes: perfis não protegidos e perfis protegidos. Para os perfis não protegidos foram efetuadas comparações entre o Método Simplificado do Eurocódigo 3 e o Método da Capacitância Global, bem como entre o numérico e o simplificado do Eurocódigo 3, para cada gama de perfis. Relativamente aos perfis protegidos, foi analisada a influência da utilização de proteção passiva com placas de gesso na resistência ao fogo dos perfis em aço, para cada gama em estudo.

No capítulo 8, conclusões e propostas de trabalhos futuros, foram exibidas as principais conclusões retiradas da análise e discussão dos resultados obtidos com o trabalho desenvolvido, bem como apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

Por último, estão disponíveis, nos anexos, as tabelas dos fatores de massividade para cada perfil estudado, fichas técnicas de resistência ao fogo dos perfis que contêm todas as curvas de evolução de temperatura calculadas através dos diferentes métodos, ábacos correspondentes a perfis não protegidos sujeitos às três curvas de incêndio nominais e os códigos utilizados no *ANSYS® Academic Student R3* para a elaboração das tabelas com os valores de tempo e temperatura referentes às curvas de incêndio nominais.

1.6 ESTADO DA ARTE

Os primeiros registos de desastres causados por incêndios começam a surgir no início da era cristã. De referir um incêndio de elevadas dimensões na cidade de Roma, ocorrido no ano 64 d.C., que destruiu todo o núcleo da cidade [11]. No entanto, as primeiras exigências de proteção contra incêndios em edificações na Europa remontam para o século XVII, devido a um incêndio de elevadas dimensões que ocorreu na cidade de Londres, Inglaterra, no ano de 1666 [11-12]. Este desastre destruiu grande parte da cidade.

Contudo, só nos finais do século XIX e inícios do século XX é que começaram a surgir os primeiros estudos e normas relativos a este tema [12]. Em 1880, na Alemanha e na década seguinte, nos Estados Unidos da América e no Reino Unido, realizaram-se os primeiros testes em laboratório, de estruturas sob a ação do fogo. Estes ensaios, já reconhecidos pela qualidade de execução, mas também pelo número de testes realizados, deram origem aos primeiros regulamentos e códigos normativos, no início do século XX.

A primeira norma que padronizou testes de resistência de materiais quando submetidos ao fogo foi estabelecida pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) que, em 1911, criou a norma “*Standard tests for fire proof constructions*” [13]. Já em 1932, a *British Standard Institution* (BSI) estabeleceu a norma BS 476 “*Fire tests on buildings materials and structures*” [14], que ainda é utilizada atualmente com regularidade. Esta norma conta com bastantes ampliações e revisões ao longo dos anos, e foi estabelecida com base em ensaios em fornos de elementos de diferentes materiais isolados.

A maioria da regulamentação em vigor é baseada em ensaios realizados a elementos estruturais isolados em fornos, o que muitas vezes conduz à realização de projetos economicamente pouco viáveis. Neste sentido, desde o início do século, alguns países da Ásia e da Europa têm realizado um esforço comum para realizar pesquisas focadas

no comportamento global ou de parte de estruturas já que, em geral, o desempenho de uma estrutura é significativamente superior ao de elementos estruturais isolados sob ação do fogo.

Na década de 90 existiu uma união de esforços entre comunidade científica e indústria de construção metálica, na tentativa de obter procedimentos e resultados mais racionais e económicos no dimensionamento de estruturas metálicas. Assim, no “*Cardington Laboratory of the Building Research Establishment*”, no Reino Unido, foram realizados ensaios, à escala real, de vários edifícios construídos em diferentes materiais (madeira, betão e aço) submetidos à ação do fogo, entre os anos de 1995 e 1997 [15]. Os testes à escala real realizados no laboratório de Cardington foram bastante utilizados e referenciados pela comunidade científica em diferentes estudos, e os seus resultados tiveram uma grande influência nas normas e regulamentos de segurança contra incêndios. Atualmente, estes ensaios são considerados uns dos principais marcos do estudo da resistência de estruturas submetidas ao fogo. Um exemplo disso é o estudo realizado, em 2001, por M. Spearpoint [16], que, através de uma análise térmica bidimensional pelo MEF no programa *THELMA*, tentou calcular a evolução da temperatura na secção transversal dos perfis em aço protegidos e não protegidos que constituíam um compartimento do segundo andar do edifício ensaiado durante o incêndio. Para este estudo, o autor teve em consideração a geometria dos perfis utilizados (perfis em I), as condições impostas pelo fogo medidas durante o teste pelos termopares e as propriedades térmicas não lineares do aço e do material de proteção (placas de gesso). No final, comparando os resultados obtidos nos testes experimentais com o MEF, o autor concluiu que o programa *THELMA* foi capaz de obter resultados aceitáveis no estudo dos perfis não protegidos. Para os perfis em aço protegidos por placas de gesso os resultados obtidos pelas modelações através do MEF não coincidem com os obtidos nos ensaios experimentais. Segundo o autor, essas discrepâncias deram-se devido ao modelo de transferência de calor não contemplar o fluxo de calor na terceira dimensão. Por outro lado, as propriedades térmicas do gesso foram estimadas pela literatura disponibilizada pelo fabricante, o que pode não corresponder totalmente à realidade. Para além disso, as temperaturas do lado não exposto ao fogo deveriam ter sido registadas durante o teste experimental de modo a que fosse conseguida uma modelação mais realista das condições fronteira durante o incêndio.

O estudo de estruturas e de elementos estruturais submetidos à ação do fogo é um tema que tem vindo a ser extensivamente estudado por vários autores nos últimos anos. No entanto, ainda possui uma quantidade significativa de aspetos por conhecer e desenvolver, carecendo de algum trabalho de investigação.

Em 2006, J. M. Franssen, [17], conduziu um estudo de forma a tentar constatar se o Método Simplificado proposto pelo Eurocódigo 3 para a determinação do perfil das temperaturas possuiria um fator de segurança significativamente menor do que o

método proposto pelo Eurocódigo 3 provisório para perfis em aço sem proteção, uma vez que é introduzido um novo fator de correção para o efeito de sombra. O estudo foi focado numa situação de incêndio nominal em que o perfil é exposto à ação do fogo nos quatro lados. Assim, foi possível demonstrar que o campo de temperaturas calculado nos perfis em aço pode diferir consoante o método utilizado, principalmente para perfis com secções em I, já que o método proposto pela nova norma conduz a um perfil de temperaturas com valores inferiores. No entanto, essa redução de temperaturas nunca excedeu os 14% e apenas se regista durante um curto período. Já para perfis com formas convexas, este método permite obter um perfil de temperaturas mais elevadas. Por fim, o autor relata que não é possível concluir que o novo método possui um nível de segurança inferior e que simplesmente não se trata de um método consistente para perfis com secções em I.

Em 2006, L. Gardner, *et al.* [18] verificaram o desempenho térmico de perfis em aço inoxidável austenítico com o objetivo de comparar a sua resistência ao fogo com o aço estrutural. Para este estudo foram realizadas comparações entre os resultados de testes experimentais existentes, simulações numéricas no programa *ABAQUS* e o Método Simplificado proposto pelo Eurocódigo 3. Este estudo contemplou as propriedades térmicas não lineares provenientes da literatura, numa exposição dos quatro lados do perfil ao fogo segundo a curva de incêndio nominal ISO 834. No final, foi concluído que os perfis em aço inoxidável austenítico oferecem uma resistência ao fogo superior do que os perfis em aço estrutural. Fundamentando-se nos resultados obtidos numericamente e nos dados dos testes experimentais, foram propostos novos valores de emissividade e de coeficiente de transferência de calor para o Método Simplificado do Eurocódigo 3.

Em 2007, F. Ferreira, *et al.* [19] apresentaram um método analítico para a determinação da distribuição da temperatura em perfis em aço parcialmente protegidos quando submetidos à ação do fogo. O método analítico baseia-se nas equações de transferência de calor por condução, convecção e radiação numa secção do perfil aquecida não homogeneamente. De modo a validar os resultados obtidos pelo método, os autores realizaram simulações numéricas no *software TASEF* para diferentes perfis de secções em I protegidos nos banzos com argamassa projetada, com espessuras de proteção que variam de 5 a 50 mm. Estes perfis foram submetidos à curva de incêndio nominal ISO 834. Por fim, foi concluído que o método proposto é suficientemente preciso para utilização no âmbito dos métodos simplificados de dimensionamento de perfis em aço em situação de incêndio, uma vez que existe boa concordância com os resultados obtidos através do MEF. Ainda foi possível concluir que, para perfis com fatores de massividade inferiores a 300 m^{-1} , deve ser utilizada proteção parcial. Em perfis com fatores de massividade superiores a 300 m^{-1} a técnica de proteção não se mostra eficiente.

Em 2009, F. Wald, *et al.* [20] realizaram testes experimentais num compartimento de uma estrutura em aço de três andares exposta à ação do fogo antes da sua demolição. O principal objetivo do estudo foi avaliar a evolução da temperatura nos elementos em aço não protegidos (perfis IPN) que constituíam a estrutura e de seguida comparar com os valores obtidos pela equação simplificada proposta pelo Eurocódigo 3. Foi concluído que o Método Simplificado proposto pelo Eurocódigo 3 revelou boa precisão quando comparado com os resultados obtidos pelos testes experimentais.

Em 2009, R. Rigobello, *et al.* [21] abordaram um estudo com a finalidade de avaliar a equação simplificada para o cálculo da temperatura da secção transversal de perfis em aço sujeitos à ação do fogo proposta pela norma brasileira NBR 14323:1999, que possui como base o Eurocódigo 3. De modo a comparar os resultados obtidos, foram realizadas simulações numéricas de diferentes perfis I em aço expostos à curva de incêndio nominal ISO 834 em três lados, tendo concluído que a norma conduz a resultados satisfatórios. Os autores ainda estudaram alguns casos não normalizados, como por exemplo um pilar em aço em contacto com duas paredes de alvenaria nos banzos expostos ao fogo num só lado, onde ficou evidente a necessidade da utilização do método de cálculo numérico para tais casos, uma vez que a utilização da norma produz resultados bastante insatisfatórios.

Em 2013, E. Fonseca [22] realizou simulações numéricas utilizando um MEF unidimensional e bidimensional com o intuito de analisar termicamente secções tubulares ocas quando sujeitas a altas temperaturas. A autora recorreu a equações simplificadas das fórmulas da transferência de calor. Para a utilização do MEF foram consideradas diferentes condições de fronteira, como a ação de um incêndio externo segundo a curva padrão ISO 834 e a secção interna composta por ar. Foram usadas as propriedades térmicas não lineares do aço presentes no Eurocódigo 3. Os resultados obtidos pelo MEF foram comparados com a solução obtida pela equação simplificada do Eurocódigo 3. Deste modo, foi concluído que para tubos de parede fina os resultados obtidos pela equação simplificada e pela solução unidimensional de elementos finitos são bastante aceitáveis. Também se concluiu que estes métodos devem ser aplicados uma vez que é necessário menor esforço computacional para serem executados. Já para tubos de parede espessa é necessário aplicar soluções bidimensionais. Ainda foi utilizado o Método da Capacitância Global, e os resultados obtidos foram ao encontro dos obtidos pelos métodos apresentados anteriormente.

Em 2013, M. Dwaikat, *et al.* [23] desenvolveram um método analítico de fácil utilização para o cálculo da temperatura na secção transversal de perfis em aço protegidos e não protegidos submetidos à ação do fogo. Neste método, os autores basearam-se na equação diferencial que governa a transferência de calor realizando as seguintes simplificações: a temperatura na secção transversal do perfil em aço deve ser considerada uniforme, o problema de radiação deve ser aproximado a um problema de

convecção, a temperatura no material de proteção deve ser considerada igual à medida da temperatura do aço e do fogo, e as propriedades térmicas do aço e do material de proteção devem ser consideradas constantes e não dependentes da temperatura. Para validar o método desenvolvido, os autores realizaram uma simulação numérica no programa ANSYS® de um perfil em aço submetido à ação do fogo em três lados, protegido por um material à base de cimento e à prova de fogo, geralmente aplicado por *spray* (CAFCO300). Baseado neste estudo, foi possível concluir que o método proposto pode ser aplicado para qualquer curva de incêndio para perfis protegidos como não protegidos expostos ao fogo até três lados uma vez que os resultados obtidos são bastante próximos do método numérico, com um erro inferior a 8%. No final, o método proposto foi comparado com o método “*best-fit line*”, tendo-se concluído que o método proposto obtém melhores resultados e pode ser aplicado para um intervalo de tempo maior.

Em 2016, L. Lausova, *et al.* [24] apresentaram um estudo com a finalidade de analisar a distribuição de temperaturas não uniformes na secção de perfis ocos quadrados em aço. Este estudo consistiu em simulações numéricas, de quatro perfis diferentes sob a ação do fogo em três lados, utilizando o MEF no programa ANSYS®. Os autores tiveram em consideração as propriedades térmicas não lineares do aço. Os resultados das simulações numéricas foram comparados com os obtidos pela equação simplificada do Eurocódigo 3 e ainda com testes experimentais realizados pelos autores. Assim, foi concluído que existe uma grande diferença entre a temperatura do lado não exposto e as temperaturas dos lados expostos ao fogo e que, para perfis com as mesmas secções, quanto menor a espessura menor será a diferença de temperatura. No final, ainda é referido que o conhecimento exato da distribuição de temperaturas é muito importante, principalmente em estruturas onde a expansão térmica é condicionada. Assim sendo, os resultados obtidos indicam que não deve ser usada qualquer equação simplificada para o cálculo das temperaturas em perfis ocos de secção quadrada expostos ao fogo em três lados.

Em 2017, A. D. Ariyanayagam, *et al.* [25] conduziram testes experimentais, em escala real, de paredes *Light Steel Frame* (LSF) não carregadas sob a ação do fogo. Para este estudo foram testadas duas paredes LSF isoladas com silicato de cálcio, com o objetivo de verificar a sua resistência ao fogo. Para efeitos de comparação, os autores realizaram também dois testes de incêndio em paredes LSF isoladas com placas de gesso. Como resultado, observou-se que a resistência ao fogo das paredes revestidas com placas de silicato de cálcio era semelhante ao das paredes revestidas com gesso. No entanto, as placas de silicato de cálcio permaneceram intactas e mantiveram a função de barreira térmica até ao final do teste, ao contrário das placas de gesso que fissuraram. Os resultados obtidos dos testes realizados às paredes revestidas com placas de silicato de cálcio também foram comparados com testes realizados anteriormente em paredes

revestidas com placas de óxido de magnésio e verificou-se que a resistência ao fogo das paredes revestidas com placas de silicato de cálcio era superior.

Em 2017, M. Wong, [26] avaliou a distribuição da temperatura ao longo do comprimento de elementos estruturais em aço sob a ação do fogo. Deste modo, o autor utilizou o Método das Diferenças Finitas (MDF) com elementos genéricos codificados parametricamente de modo a resolver as equações de transferência de calor. Para verificar os resultados obtidos, realizaram-se análises a tubos em aço com dois metros de comprimento com diferentes espessuras, cujos resultados foram comparados com os obtidos pelo Método proposto pelo Eurocódigo 3. Assim, foi possível concluir que o método apresenta resultados mais próximos da realidade do que o proposto pelo Eurocódigo 3.

Em 2017, P. Piloto, *et al.* [27] avaliaram o comportamento térmico de paredes LSF expostas ao fogo. Para este estudo, os autores realizaram simulações numéricas no programa computacional ANSYS® e utilizaram um método de cálculo simples unidimensional, com vista a comparar os resultados e verificar a resistência do fogo deste tipo de paredes protegidas com placas de gesso e isoladas com lã de rocha nas cavidades. Este método unidimensional utiliza uma solução em regime transiente incremental e não linear. A temperatura do lado exposto ao fogo é dada pela curva nominal ISO 834 e foram utilizadas as propriedades térmicas não lineares do aço propostas pelo Eurocódigo 3. Para as placas de gesso e lã de rocha, as propriedades térmicas usadas foram definidas através da literatura existente. Como conclusão, os autores evidenciam que os métodos utilizados apresentaram resultados com boa concordância e que a utilização do dobro da espessura de gesso aumentou a resistência ao fogo em 120%. Os autores ainda salientam que o método unidimensional deve ser utilizado numa fase preliminar do projeto uma vez que é de fácil utilização e evita custos com ensaios experimentais. No entanto, o comprimento característico do modelo em estudo deve ser bem definido de forma a obter bons resultados quando comparados com a simulação numérica e com a realidade.

Em 2018, M. Imran, *et al.* [28] abordaram o comportamento térmico e mecânico de vigas I em aço protegidas passivamente sob a ação da curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos. Foi realizada uma análise não linear através do MEF para vigas não protegidas, totalmente protegidas e parcialmente protegidas, com uma carga imposta de 40 kN. Os resultados obtidos mostraram que os perfis totalmente protegidos conseguem resistir ao fogo e manter a integridade estrutural durante um tempo significativamente maior do que vigas parcialmente protegidas, principalmente para um incêndio de Hidrocarbonetos. No entanto, os autores referem que é necessária a realização de investigação adicional de forma a validar os resultados obtidos pelo MEF.

Em 2018, W. Chen, *et al.* [29] realizaram testes experimentais, em escala real, em seis estruturas iguais sujeitas à curva nominal de incêndio ISO 834, com a finalidade em analisar o comportamento térmico de paredes formadas por um conjunto de perfis em aço conformados a frio, revestidos com placas de gesso em condições de incêndio. Neste estudo, os autores recorreram aos procedimentos propostos pelo Eurocódigo 3 e, para determinar as propriedades térmicas do gesso, contemplaram dados baseados em ensaios experimentais realizados anteriormente, onde os resultados eram insatisfatórios no que respeita à condutibilidade térmica do gesso a temperaturas elevadas. Assim, foram realizados novos ensaios para a determinação da condutibilidade térmica do gesso a temperaturas elevadas. No final, foi realizada uma análise através do MEF num programa computacional para simular o colapso das placas de gesso. A distribuição de temperaturas do lado não exposto ao fogo obtida foi próxima do ensaio experimental. No entanto, existe uma diferença significativa na temperatura próximo da cavidade da amostra, pelo que os autores constatarem que é necessário o desenvolvimento de um modelo mais refinado de transferência de calor do conjunto, de modo a fornecer uma distribuição de temperaturas mais precisa.

Em 2018, B. Zhong, *et al.* [30] testaram experimentalmente, em escala real, uma estrutura porticada em aço (12x6 m), exposta a um incêndio natural, com o objetivo de estudar o seu comportamento térmico e estrutural, bem como os indícios de colapso. A estrutura foi constituída com perfis I em aço não protegidos e isolada com painéis *sandwich* de lã de rocha no telhado e paredes. A estrutura continha dois compartimentos, sendo que o incêndio foi iniciado no interior do compartimento mais pequeno (4x6 m). A parede interna divisória possuía uma resistência ao fogo de 3 horas. Foram acoplados termopares e transdutores lineares (LVDT) na estrutura, de forma a medir as temperaturas e deslocamentos nas regiões críticas. Os resultados obtidos pelos autores mostram que existe uma diferença significativa entre a curva de incêndio nominal ISO 834 e a gerada num incêndio natural, o que destaca a necessidade de revisão do padrão estrutural de segurança e que a proteção das colunas em aço é essencial. A parede interior divisória com resistência ao fogo mostrou-se bastante eficaz para prevenir a propagação do incêndio e o colapso total da estrutura.

Em 2019, W. Chen, *et al.* [31] voltaram a estudar termicamente paredes LSF, sem qualquer aplicação de carga, de perfis em aço conformados a frio, sujeitos a quatro situações de incêndio diferentes e revestimentos. Neste estudo, tal como no anterior, foram testados experimentalmente, em escala real, oito conjuntos de perfis em aço conformados a frio revestidos com diferentes combinações de placas de gesso e silicato de cálcio em ambos os lados, tendo como isolamento lã de rocha. Cada conjunto foi submetido a 285 minutos de incêndio segundo 4 curvas de incêndio diferentes (curva nominal de Hidrocarbonetos, curva de Elementos Exteriores, curva ISO 834 e curva de incêndio real). Os resultados do estudo mostraram que as amostras ensaiadas sujeitas à curva de Hidrocarbonetos e à curva de incêndio real sofreram danos muito mais

graves, sendo visível encurvadura local significativa nos perfis, principalmente após ocorrer o colapso do revestimento do lado do fogo. Em relação às amostras ensaiadas segundo a curva de Elementos Exteriores, estes demonstraram uma transferência de calor praticamente estacionária. No final, os autores ainda constataram que a utilização de uma placa de silicato de cálcio, em substituição de uma placa de gesso, aumenta significativamente o desempenho estrutural e de isolamento deste tipo de paredes.

Em 2019, S. Khetata, *et al.* [32] realizaram seis ensaios experimentais, em fornos, de paredes LSF com o objetivo de avaliar a influência na resistência ao fogo da utilização de camadas de proteção e de isolamento das cavidades. Foram comparados dois tipos diferentes de LSF (3 e 5 perfis em aço) juntamente com dois materiais de isolamento (lã de rocha e fibra cerâmica) e diferentes combinações de placas de proteção (gesso, cortiça e madeira). O aquecimento no forno seguiu a curva nominal de incêndio ISO 834 e, de forma a registar a evolução da temperatura nas paredes testadas foram utilizados diversos termopares do tipo K e uma câmara térmica para medir a temperatura do lado não exposto ao fogo. Para validar os testes experimentais foram utilizados dois métodos de simulação numérica no programa ANSYS®. O primeiro método utiliza uma solução térmica e de dinâmica de fluidos (ANSYS® FLUENT). Esta análise considera um escoamento laminar do fluido e é baseada na variação da densidade. O segundo método considera apenas a análise térmica para sólidos e assume um contacto perfeito entre os materiais (ANSYS MULTIPHYSICS). Por último, é concluído que a resistência ao fogo aumenta com o número de perfis utilizados, com o aumento da espessura das placas de material de proteção e que a fibra cerâmica oferece maior resistência ao fogo do que a lã de rocha. Os resultados obtidos pelos métodos numéricos foram bastante similares com os experimentais. No entanto, a utilização do segundo método numérico obteve um erro relativo menor, uma vez que foi possível ter em consideração a degradação das placas de gesso e a combustão da cortiça e da madeira.

Em 2019, A. Correia, *et al.* [33] apresentaram um estudo, baseado numa análise geométrica e material não linear, de forma a propor novas expressões para o cálculo do fator de massividade de perfis em aço em contacto com paredes. Neste estudo foram analisados 26 perfis, com duas espessuras de parede de tijolo diferentes e com duas orientações da alma em relação à parede, dando um total de 94 casos estudados. Para o cálculo do campo de temperaturas na secção transversal do perfil foi utilizada a equação simplificada proposta pelo Eurocódigo 3 e quatro fórmulas distintas para o cálculo do fator de massividade. Seguidamente, através do MEF no programa ABAQUS foram calculadas as temperaturas na secção transversal dos perfis com o intuito de comparar os resultados. No final, os autores apresentaram coeficientes de correção a aplicar nas fórmulas do Eurocódigo 3 de forma a obter uma aproximação mais real das temperaturas num perfil durante a ocorrência de um incêndio.

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

2.1 AÇO

2.2 GESSO

2.3 AR

2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Tanto no estudo analítico como numérico da distribuição de temperaturas ao longo da secção transversal de elementos estruturais sob a ação do fogo, as propriedades térmicas do material que constitui o elemento possuem um peso significativo nos resultados obtidos. Desta forma, para que os resultados obtidos através dos métodos analíticos ou numéricos sejam fidedignos, é necessário que as propriedades utilizadas sejam próximas da realidade.

Quando o risco de incêndio é elevado, existe uma possibilidade acrescida de ocorrerem danos significativos na estrutura, devido ao aumento excessivo da temperatura num elemento estrutural. Por isso, é recorrente a utilização de um material de proteção cuja eficácia contra o fogo está diretamente relacionada com as suas propriedades térmicas, como, por exemplo a condutibilidade térmica ou o calor específico [5]. Neste trabalho, utilizou-se o gesso como material de proteção.

Em construção metálica, o uso de materiais de proteção pode muitas vezes impor a formação de cavidades ou vazios na estrutura. Por conseguinte, é necessário conhecer as propriedades térmicas do ar de modo a conseguir modelar o efeito desses vazios.

Deste modo, este capítulo debruça-se sobre a determinação das propriedades térmicas do aço, do gesso e do ar.

2.1 AÇO

As propriedades térmicas do aço são obtidas a partir do Eurocódigo 3 - Parte 1-2 [34] e variam de acordo com equações analíticas, entre de intervalos de tempo definidos.

No aço, as suas propriedades térmicas sofrem alterações com o aumento da temperatura, principalmente entre os 600 e 800°C, onde se verifica um fenómeno de transformação metalúrgica, responsável pelo início da mudança de fase [35].

Neste trabalho, pelo facto de o aço não sofrer perda de massa durante o incremento da temperatura, considerou-se a sua massa volúmica constante, com um valor de 7850 kg/m³.

2.1.1 Calor Específico

O calor específico, C_a , é a propriedade térmica que representa a capacidade do aço conseguir armazenar a quantidade de energia (calor) necessária para elevar um grau num metro cúbico [36].

Para o aço, a evolução do calor específico dá-se em função da sua temperatura, e deve ser obtida de acordo com as equações analíticas apresentadas na Tabela 2.1 [34].

Tabela 2.1 - Variação do calor específico do aço em função da temperatura [34]

Temperatura	Calor específico - C_a [J/kgK]
$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 600^{\circ}\text{C}$	$C_a = 425 + 7.73 \times 10^{-1}(\theta_a) - 1.69 \times 10^{-3}(\theta_a)^2 + 2.22 \times 10^{-6}(\theta_a)^3$
$600^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 735^{\circ}\text{C}$	$C_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a}$
$735^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 900^{\circ}\text{C}$	$C_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731}$
$900^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 1200^{\circ}\text{C}$	$C_a = 650$

Segundo o Eurocódigo 3, para simplificar alguns cálculos é possível utilizar um valor de C_a constante e igual a 650 J/kgK para todo o intervalo de temperaturas. Na Figura 2.1 é representada graficamente a sua evolução em função da temperatura do aço, de acordo com as equações apresentadas anteriormente. O pico apresentado no gráfico, entre os 600 e 800°C, deve-se à transformação metalúrgica do aço.

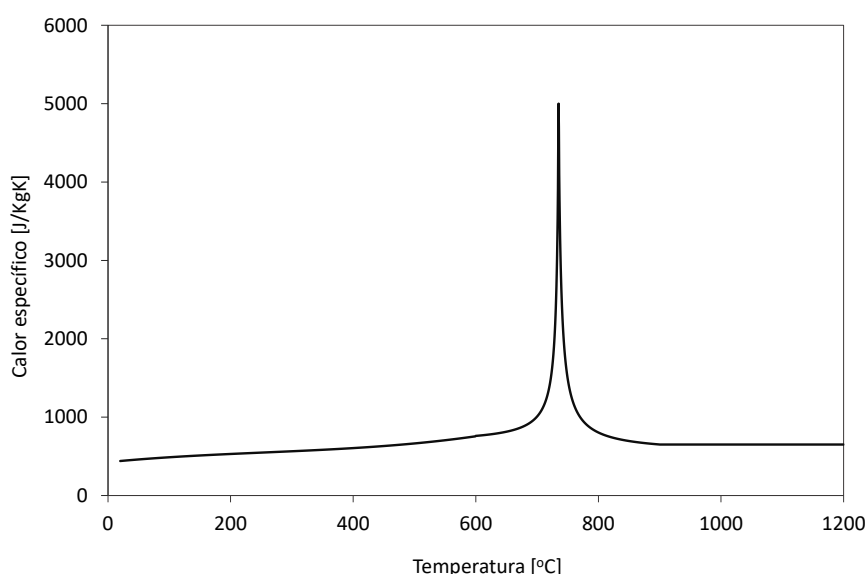


Figura 2.1 - Calor específico do aço em função da temperatura

2.1.2 Condutibilidade Térmica

A condutibilidade térmica do aço, λ_a , traduz a maior ou menor capacidade que o mesmo possui em deixar passar calor por si [36]. A representação gráfica da condutibilidade térmica em função da temperatura do aço pode ser observada na Figura 2.2, de acordo com as equações analíticas apresentadas na Tabela 2.2 [34].

Tabela 2.2 - Variação da condutibilidade térmica do aço em função da temperatura [34]

Temperatura	Condutibilidade térmica - λ_a [W/mK]
$20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800^\circ\text{C}$	$\lambda_a = 54 - 3.33 \times 10^{-2}(\theta_a)$
$\theta_a \geq 800^\circ\text{C}$	$\lambda_a = 27.3$

O Eurocódigo 3 – Parte 1-2 sugere ainda que, para cálculos simples, é possível ser utilizado um valor de condutibilidade térmica do aço constante e igual a 45 W/mK para todo o intervalo de temperaturas.

Tal como é possível observar na Figura 2.2, o aço possui uma condutibilidade térmica bastante elevada. No entanto, à medida que a sua temperatura aumenta este valor vai diminuindo. Quando a temperatura do aço atinge os 800°C o valor de condutibilidade térmica mantém-se constante.

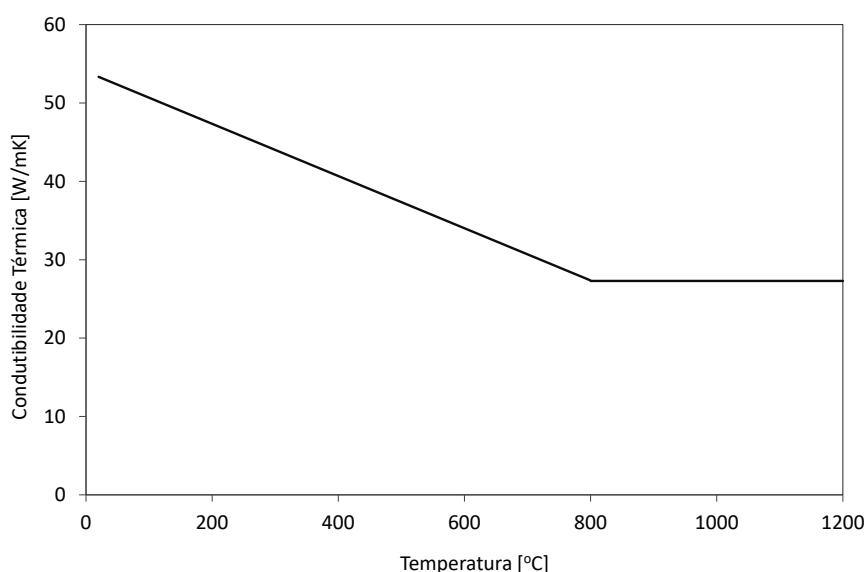


Figura 2.2 - Condutibilidade térmica do aço em função da temperatura

2.1.3 Difusibilidade Térmica

A difusibilidade térmica de um material é definida como a relação entre a condutibilidade térmica e a retenção do calor no meio. Esta propriedade traduz a maior ou menor facilidade com que o calor se difunde no meio. Tal como as propriedades referidas anteriormente, a difusibilidade térmica também varia com o aumento da temperatura e pode ser calculada segundo a equação 2.1.

$$\alpha = \frac{\lambda_a}{\rho C_a} \quad (2.1)$$

A difusibilidade térmica do aço foi calculada pela equação apresentada, de acordo com as propriedades térmicas já estudadas. A sua evolução gráfica em função da temperatura pode ser observada na Figura 2.3.

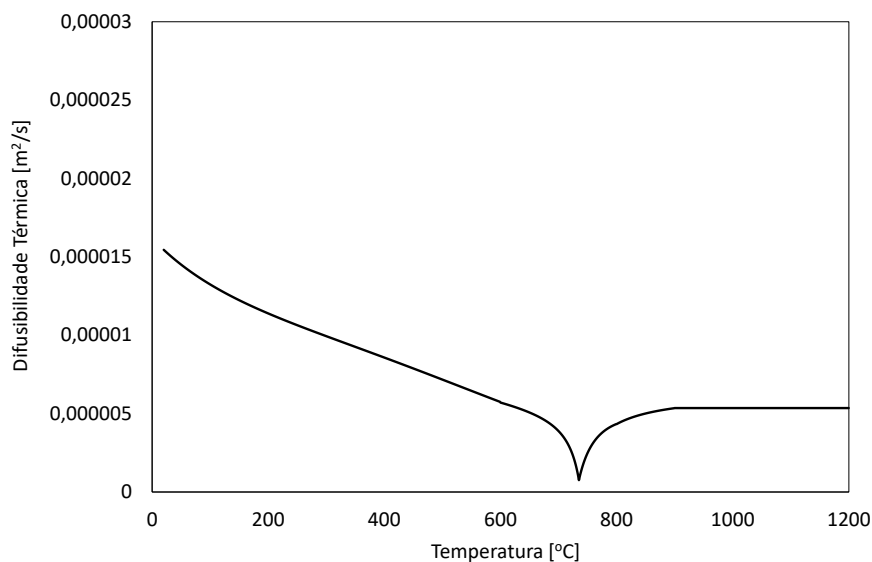


Figura 2.3 - Difusibilidade térmica do aço em função da temperatura

Analisando a Figura 2.3 observa-se que, à medida que a temperatura aumenta a difusibilidade térmica diminui. Isto implica que quanto maior for a temperatura do aço, mais lento será o seu aquecimento, uma vez que existirá maior dificuldade para o calor se difundir no meio. Ainda é notável um pico entre os 600 e 800°C que é justificado pela evolução do calor específico devido à mudança metalúrgica do aço nesse intervalo de temperaturas.

2.2 GESSO

Como referido anteriormente, o aço diminui severamente a sua resistência mecânica com o aumento da temperatura. Por este motivo, as estruturas metálicas não protegidas

dificilmente conseguem cumprir as exigências impostas pelos regulamentos de segurança sem que se adotem as medidas adequadas. O método mais utilizado para proteção de elementos estruturais em aço é a utilização de materiais de proteção térmica (proteção passiva) [8]. Existem vários tipos de materiais de proteção, sendo que neste trabalho se selecionou o gesso como proteção a estudar.

O gesso, quando se encontra no estado seco, é um sólido poroso composto por sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) que contém cerca de 20% de água cristalizada. Quando sujeito à ação de temperaturas elevadas, este absorve elevadas quantidades de calor e a água existente na sua constituição vaporiza, absorvendo o calor e servindo como uma barreira térmica à passagem de fluxo térmico para o aço [5, 37].

O gesso, sob a forma de painel, é um dos materiais mais utilizados para proteção passiva em estruturas em aço, pois possui boa resistência ao fogo devido às suas propriedades térmicas, possui um aspeto final agradável, é de fácil fabricação e de baixo custo [38-39]. Os painéis de gesso podem conter outros materiais na sua constituição que melhorem a sua resistência ao fogo (aditivos), mas são caracterizados essencialmente pelo seu núcleo, que é constituído maioritariamente por gesso e que é ligado de cada lado a um suporte adequado que deve ser resistente para evitar que ocorra a sua desagregação. Normalmente, para os painéis, são utilizadas folhas de cartão que são fortemente pressionadas contra o núcleo (gesso acartonado ou *drywall*) [5]. Na Figura 2.4 é possível observar diferentes tipos de painéis de gesso.



Figura 2.4 - Exemplos de painéis de gesso. a) Painel de gesso básico para proteção ao fogo [40] e b) Painéis de gesso com diferentes formas e cores para preencher critérios estéticos [41].

2.2.1 Tipos de Gesso

Como referido anteriormente, os painéis de gesso são essencialmente caracterizados pelo seu núcleo que é ligado a uma folha de cartão. A folha de cartão serve

especialmente para evitar a desagregação do núcleo, mas também pode variar de acordo com a aplicação pretendida para o painel, bem como o núcleo que pode ser manipulado com a utilização de aditivos para corresponder melhor ao tipo de aplicação. De acordo com a norma BS 520:2004 [42], existem diferentes tipos de painéis de gesso que são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Tipos de gesso e as suas características

Tipo de gesso	Características
Tipo A	Painéis de gesso com a face apropriada para efeitos estéticos.
Tipo H	Painéis de gesso com absorção de água reduzida.
Tipo F	Painéis de gesso que possuem fibras minerais ou aditivos no núcleo para melhorara sua coesão a altas temperaturas. Também podem ser utilizados para efeitos decorativos.
Tipo E	Painéis de gesso fabricados essencialmente para revestimento em paredes externas, não se destinam a decoração e a folha de cartão utilizada reduz a taxa de absorção de água.
Tipo P	Painéis de gesso com uma face destinada a receber gesso ou a ser combinada por colagem com outros materiais.
Tipo D	Painéis de gesso com massa volúmica controlada de modo a permitir um melhor desempenho em determinadas aplicações. Podem ser utilizados para efeitos estéticos ou decorativos.
Tipo R	Painéis de gesso com resistência mecânica melhorada e possuem uma face na qual podem ser aplicadas decorações.
Tipo I	Painéis de gesso com dureza superficial aprimorada. Possuem uma face própria para efeitos estéticos ou decorativos.

2.2.2 Propriedades Térmicas do Gesso

As propriedades térmicas do gesso, tal como as do aço, variam em função da temperatura. Principalmente a condutibilidade térmica e o calor específico [38]. No entanto, analisando a literatura existente sobre esta temática é possível verificar que os valores obtidos variam significativamente. O facto de o gesso ser um material poroso, não homogéneo, húmido e a sua constituição depender bastante do seu processo de

fabrico e do seu fabricante, origina uma certa dificuldade em se obter resultados experimentais uniformes e credíveis [43]. De salientar ainda que, também os métodos experimentais utilizados na obtenção destas propriedades variam de acordo com o autor, pelo que se observa alguma variação dos resultados apresentados na literatura existente.

Nesta dissertação será utilizado o gesso do tipo F uma vez que, segunda a norma BS 520:2004 [42], este é o tipo de gesso indicado para a proteção contra incêndios. Desta forma, serão apresentadas, seguidamente, as propriedades térmicas deste tipo de gesso.

2.2.2.1 Massa Volúmica

Em 2010, A. Frangi, *et al.* [44] realizaram um estudo experimental, no Instituto Geotécnico de Engenharia de Zurique, que consistiu em submeter painéis de gesso do tipo A, a uma taxa de aquecimento de 20°C por minuto. Através de Análise Termogravimétrica (TGA) foi possível registar a perda de massa resultante do aquecimento do painel de gesso. Verificou-se que entre os 100°C e 170°C, existiu uma perda de massa de 17% e, entre os 600°C e 750°C, de 5% da massa restante. No final, foram analisados os resultados da análise TGA de gases e aferiu-se que na primeira perda de massa foi, essencialmente, libertada água e na segunda apenas dióxido de carbono. Assim, através destes dados experimentais foi possível estabelecer a variação da massa volúmica do gesso tipo F em função da temperatura.

Para a massa volúmica do gesso tipo F à temperatura ambiente, utilizou-se como referência do estudo de A. Frangi, *et al.* [44] descrito com o valor de 889 kg/m³. A evolução da massa volúmica em função do aumento da temperatura do gesso pode ser analisada na Figura 2.5.

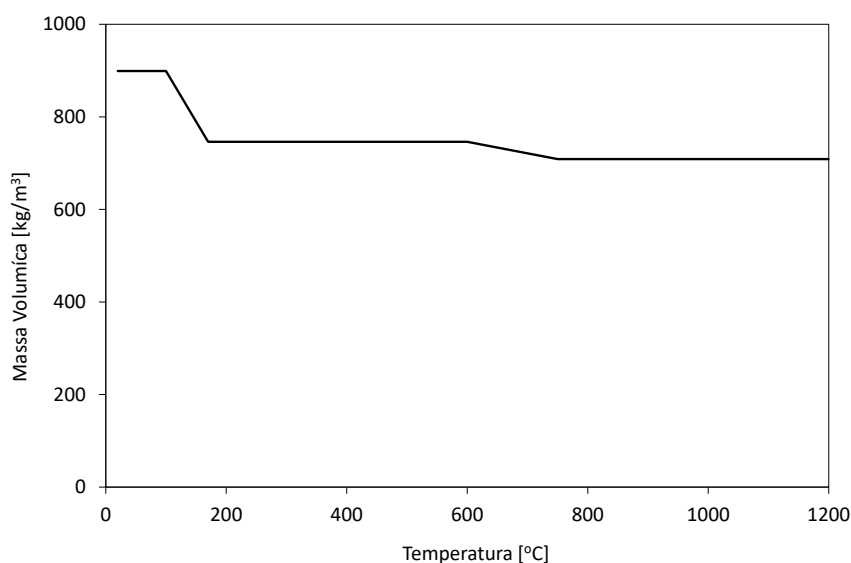


Figura 2.5 - Massa volúmica do gesso tipo F em função da temperatura

2.2.2.2 Calor Específico

O calor específico do gesso tem como base, em praticamente todo o intervalo de temperaturas, o valor de 950 J/kgK. Este apenas apresenta dois picos que estão diretamente relacionados com os períodos de desidratação do gesso (perda de massa) [43]. O primeiro pico verifica-se entre os 100°C e 170°C, em que o calor específico atinge um valor de 25000 J/kgK e o segundo entre os 650°C e 700°C, onde atinge um valor de 10000 J/kgK. Estes picos correspondem à energia consumida durante a evaporação e dissociação de moléculas de água, bem como a movimentação da água, no interior do gesso, das regiões mais quente para as regiões mais frias [38]. Na Figura 2.6 é possível verificar o comportamento do calor específico do gesso em função da temperatura.

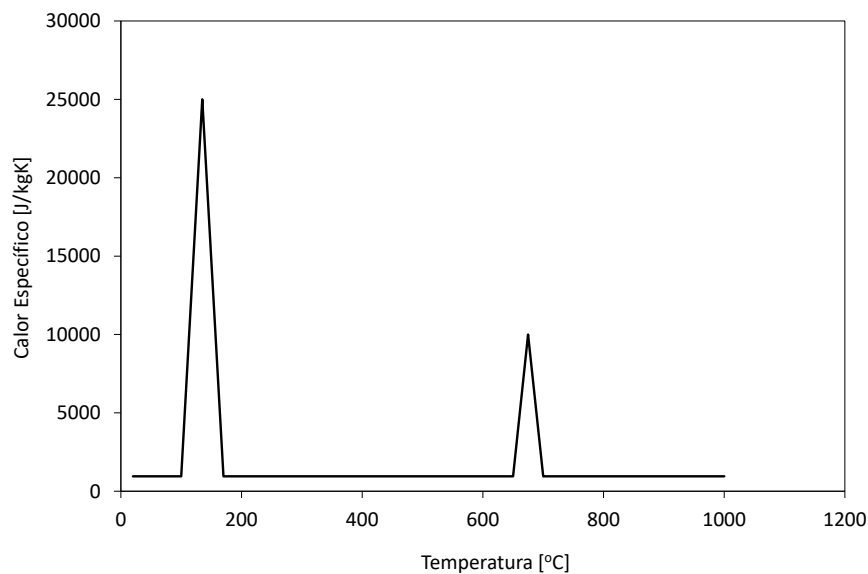


Figura 2.6 - Calor específico do gesso tipo F em função da temperatura

2.2.2.3 Condutibilidade Térmica

A condutibilidade térmica do gesso é a propriedade térmica mais difícil de determinar devido aos efeitos provocados pela humidade e transferência de calor por radiação no interior dos poros [45]. Gessos de diferentes fabricantes podem variar na sua composição bem como os métodos utilizados para medir esta propriedade, o que faz com que existam na literatura resultados bastante dispersos sobre este tema [46]. Para uniformizar este problema, I. Rahmanian, *et al.* [38], combinando vários resultados de estudos realizados, formularam novas expressões para o cálculo da condutibilidade térmica assumindo que o gesso é um substrato sólido e os poros esféricos são destruídos uniformemente. Na Figura 2.7 são apresentados os valores de condutibilidade térmica para o gesso do tipo F em função do aumento da temperatura, segundo o estudo descrito.

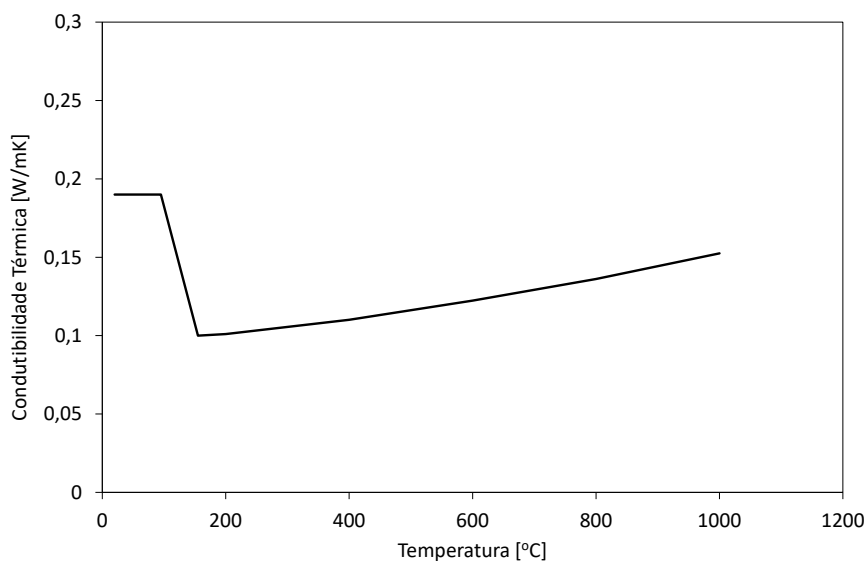


Figura 2.7 - Condutibilidade térmica do gesso tipo F em função da temperatura

2.2.2.4 Difusibilidade térmica

A difusibilidade térmica do gesso foi calculada de acordo com a equação 2.1 e considerando as propriedades térmicas estudadas. A evolução gráfica da difusibilidade térmica do gesso do tipo F em função da temperatura é apresentada na Figura 2.8.

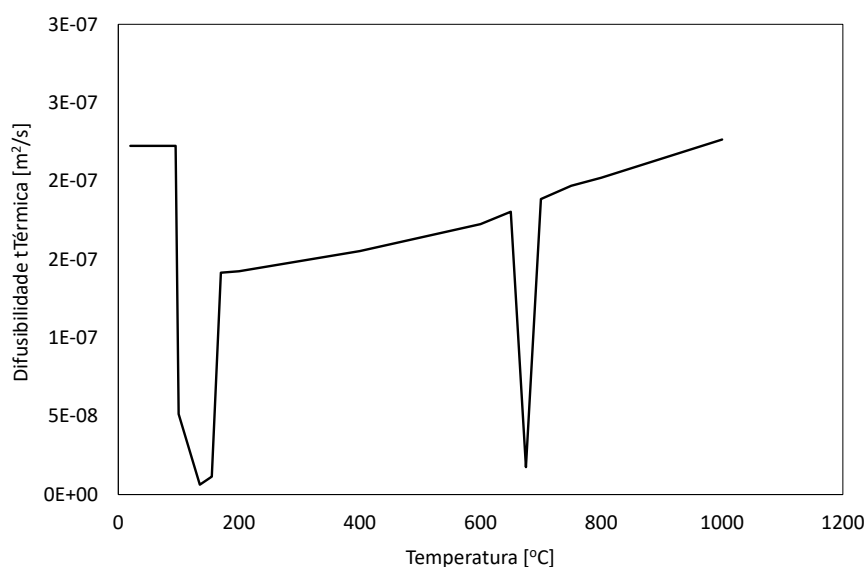


Figura 2.8 - Difusibilidade térmica do gesso tipo F em função da temperatura

A difusibilidade do gesso é aproximadamente cem vezes inferior à do aço, o que indica que a velocidade de propagação do calor no gesso é bastante inferior fazendo dele um ótimo material de proteção térmica. Os dois picos negativos apresentados na Figura 2.8 estão diretamente relacionados com os picos do calor específico do gesso (Figura 2.6).

As propriedades térmicas do gesso, podem ainda ser consideradas constantes, como é o caso das enunciadas pelo Comité Técnico Europeu (ECCS) *Fire Resistance of Steel Structures* [47], apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Propriedades térmicas constantes preconizadas pelo Comité Técnico Europeu (ECCS) [47]

Massa Volúmica [kg/m ³]	Calor Específico [J/kgK]	Condutibilidade Térmica [W/mK]
650	1100	0,12

2.3 AR

No projeto de construção metálica, principalmente no dimensionamento da resistência de elementos estruturais ao fogo, justifica-se o recurso à utilização de materiais de proteção. O principal objetivo da utilização deste tipo de materiais é diminuir o aquecimento do elemento estrutural por condução, retardando o colapso do elemento e consequentemente da estrutura. No entanto, dependendo do esquema e do material de proteção utilizado, dá-se a criação de vazios ou cavidades de ar na estrutura [4,30], como se observa na Figura 2.9.

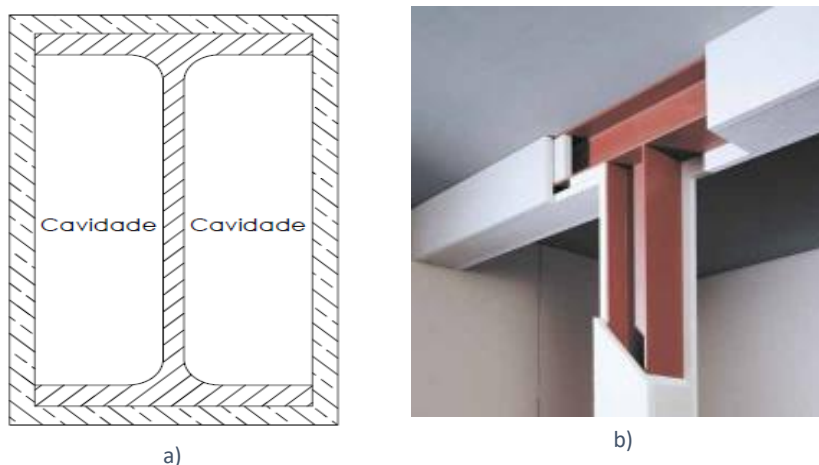


Figura 2.9 - Proteção passiva de perfis em aço. a) Perfil protegido em caixão e b) Vigas e colunas protegidas com placas de gesso [48]

Assim, é necessário estudar as propriedades térmicas do ar, a fim de se conseguir modelar os vazios ou cavidades para que os resultados obtidos sejam os mais próximos da realidade possível.

Tal como nos dois materiais já apresentados, as propriedades térmicas do ar também variam em função da temperatura e é possível encontrar a sua variação tabelada em diversa literatura sobre transferência de calor [49].

A massa volúmica do ar pode variar com as alterações da temperatura, da humidade ou com a composição do ar seco. A sua variação em função do aumento da temperatura é pouco significativa e em diversa literatura, verifica-se que para cálculos simples é possível utilizar um valor constante de $1,225 \text{ kg/m}^3$. Este valor, de acordo com a *International Standard Atmosphere* (ISA) corresponde à massa volúmica do ar ao nível do mar e a uma temperatura de 15°C . A evolução da massa volúmica do ar em função do aumento da temperatura pode ser analisada na Figura 2.10.

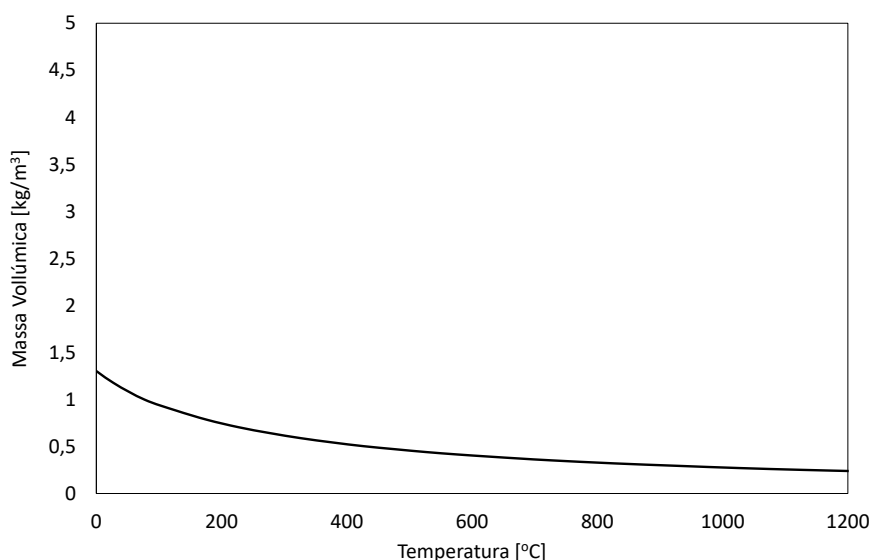


Figura 2.10 - Massa volúmica do ar em função da temperatura

O calor específico do ar varia em função da temperatura de forma pouco significativa. Este aumenta com o aumento a temperatura do ar entre os 1000 J/kgK e os 1200 J/kgK . A variação do calor específico do ar em função da temperatura é apresentada na Figura 2.11.

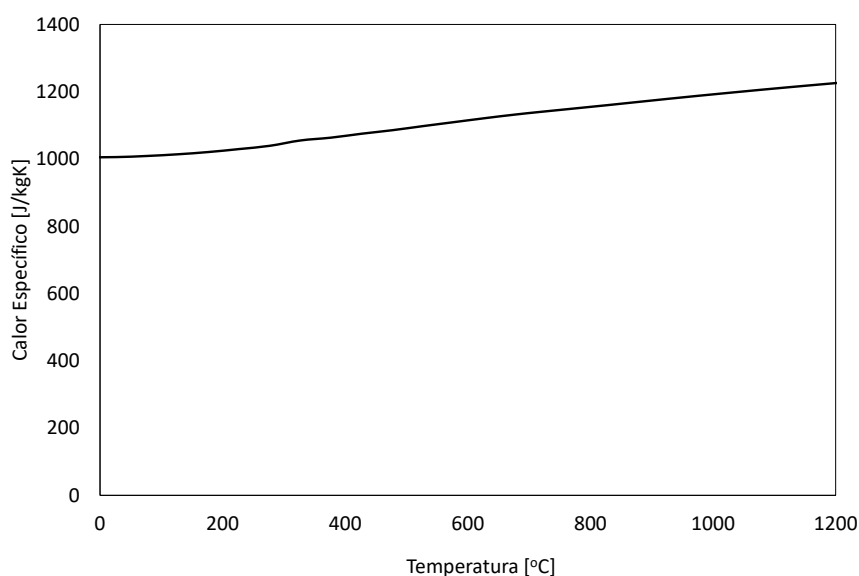


Figura 2.11 - Calor específico do ar em função da temperatura

O ar possui valores de condutibilidade térmica baixa, o que significa que este material oferece alguma resistência térmica à passagem do calor. À semelhança das propriedades anteriores, esta também varia com o aumento da temperatura, sendo que o seu valor varia entre 0,025 e 0,095 W/mK. Na Figura 2.12 é apresentada a variação da condutibilidade térmica em função da temperatura.

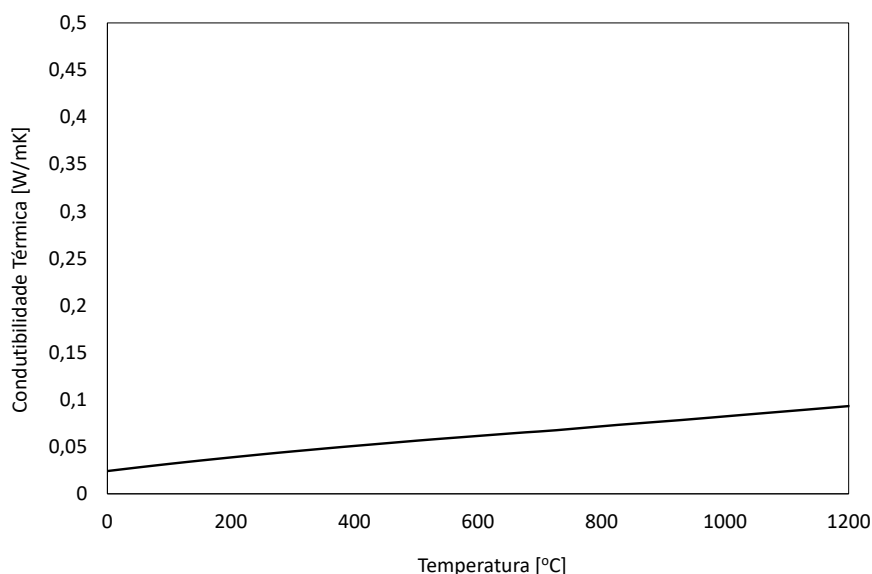


Figura 2.12 - Condutibilidade térmica do ar em função da temperatura

A evolução da difusibilidade térmica do ar em função do aumento da temperatura varia de forma muito ligeira. À semelhança do que acontece com o gesso, a difusibilidade térmica do ar aumenta à medida que a sua temperatura aumenta. Sendo assim, à medida que o ar é aquecido o calor propaga-se mais rapidamente. Os valores de difusibilidade térmica em função da temperatura podem ser consultados na Figura 2.13.

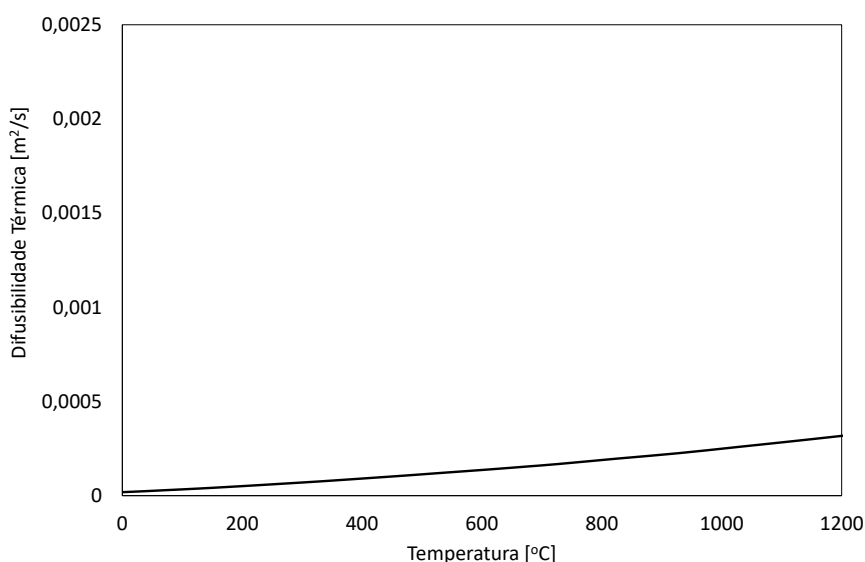


Figura 2.13 - Difusibilidade térmica do ar em função da temperatura

MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

- 3.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO
- 3.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVEÇÃO
- 3.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO

3 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor é a ciência que estuda as trocas de energia entre dois sistemas, ou entre um determinado sistema e o meio em que este se insere, causadas pela diferença de temperaturas [40-41].

Durante um incêndio, a temperatura dos elementos estruturais aumenta ao longo do tempo até se aproximar da temperatura dos gases quentes. Assim, de modo a definir a evolução da temperatura nos mesmos, é especialmente necessário conhecer os mecanismos de transferência de calor envolvidos num incêndio: condução, convecção e radiação, uma vez que é importante que sejam conhecidos dos diferentes modos de geração e dissipação de energia. Os três métodos de transferência de calor serão apresentados no presente capítulo.

3.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO

A condução é o mecanismo de transferência de calor pelo qual a energia calorífica é transmitida, num corpo sólido ou num fluido estacionário, das moléculas que possuem maior energia cinética (maior temperatura) para as moléculas com menor energia cinética (menor temperatura), por colisão atômica e sem que exista qualquer transferência de massa [28,41]. Na Figura 3.1 é apresentado, esquematicamente, o processo de transferência de calor por condução.

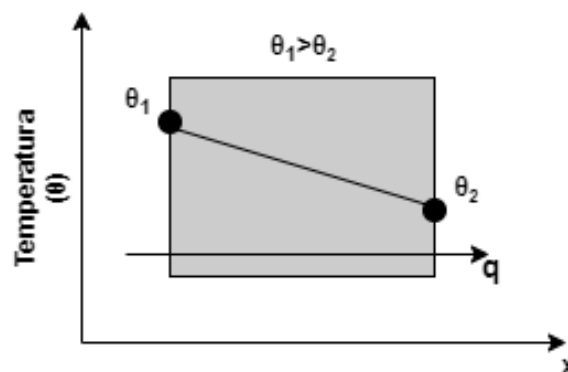


Figura 3.1 - Condução através de um sólido ou um fluido estacionário

Para condições estacionárias, a transferência de calor por condução é diretamente proporcional ao gradiente da temperatura entre dois pontos. A lei fundamental que rege

a transmissão de calor foi proposta por Jean Fourier [51], em 1822, e anuncia que a quantidade de calor, Q , que atravessa uma área normal à direção do fluxo de calor, numa unidade de tempo, é proporcional ao produto da área pelo gradiente térmico. Esta lei é expressa pela equação 3.1.

$$Q = -\lambda A \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (3.1)$$

Em que:

λ - Condutividade térmica [W/mK];

A - Área da secção transversal através da qual o calor flui por condução [m²];

$\frac{\partial \theta}{\partial x}$ - Gradiente de temperatura [K/m].

O sinal negativo na equação 3.1 decorre de o fluxo de calor ter lugar no sentido contrário ao gradiente de temperatura. Para condições unidimensionais, a quantidade de calor por unidade de área, q , é designada por fluxo de calor e é expressa pela equação 3.2.

$$q = \frac{Q}{A} = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (3.2)$$

A equação básica que governa a condução de calor num sólido, considerando este um elemento tridimensional infinitesimal, para um material isotrópico e aplicando a primeira lei da termodinâmica (Lei da Conservação de Energia), é dada pela expressão 3.3.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3.3)$$

Em que:

\dot{Q} - Calor gerado no interior do elemento [W];

ρ - Massa volúmica [kg/m³];

c_p - Calor específico [J/kgK].

Para materiais homogéneos e com condutividade térmica constante, a equação 3.3 pode ser simplificada, tomando a forma da equação 3.4, em que α é a difusibilidade térmica do material.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{\dot{Q}}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3.4)$$

3.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

A transferência de calor por convecção dá-se através das trocas de calor entre fluidos em movimento, ou entre estes e superfícies sólidas quando estes se encontram com temperaturas distintas [49]. Existem dois tipos de convecção: a convecção natural, quando as correntes de convecção existem, unicamente, devido à diferença de densidade do fluido provocada pelo gradiente térmico, e a convecção forçada, quando as correntes de convecção são provocadas por fatores externos como bombas, reações de queima, explosões ou ventiladores [50].

O efeito global da convecção está representado na Figura 3.2, e pode ser expressa através da lei de arrefecimento proposta por Isaac Newton em 1701 e é apresentada na equação 3.5.

$$Q_c = h_c A (\theta - \theta_\infty) \quad (3.5)$$

Em que:

Q_c - Quantidade de calor por convecção que atravessa a área A [W];

h_c - Coeficiente de transferência de calor por convecção [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$];

A - Área da superfície perpendicular á interface sólido-fluido [m^2];

θ - Temperatura da superfície;

θ_∞ - Temperatura do fluido.

O fluxo de calor por convecção, q_c , em W/m^2 , é determinado pela equação 3.6.

$$q_c = h_c (\theta - \theta_\infty) \quad (3.6)$$

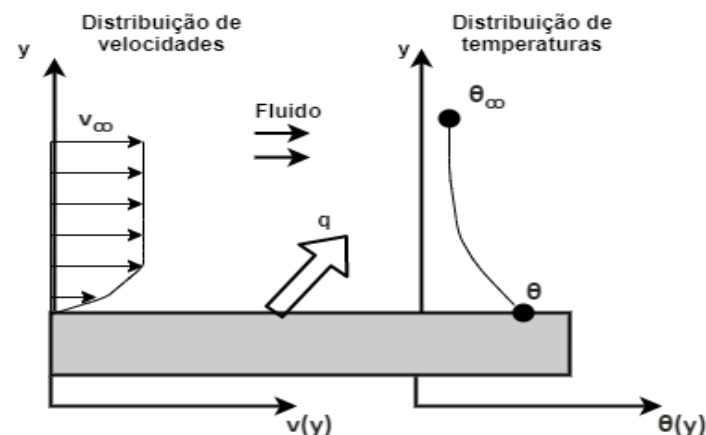


Figura 3.2 - Convecção de uma superfície para um fluido em movimento

A transferência de calor por convecção é um dos fatores mais importantes num incêndio. Este mecanismo de transferência de calor é responsável pelo transporte dos gases quentes, pela propagação das chamas e pela movimentação ascendente do fumo [9].

Na análise térmica de um elemento estrutural sob a ação do fogo, o fenómeno de convecção dá-se entre um fluido e a superfície de um sólido. Assim, o processo de transferência de calor por convecção apenas é utilizado como uma condição fronteira para o sólido em estudo sendo que, neste caso, não é necessário a determinação das velocidades que se desenvolvem no fluido, devido às correntes de convecção [9].

3.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO

A radiação é um mecanismo de transferência de calor bastante particular, uma vez que, ao contrário dos fenómenos estudados anteriormente, este não necessita de matéria para se propagar. Este fenómeno consiste na transmissão de energia calorífica através de ondas eletromagnéticas que podem viajar pelo vácuo, sólidos transparentes ou líquidos. Existem ainda outras formas de radiação, como os raio-X, a luz visível ou as ondas radio, mas que diferem no seu intervalo de comprimento de onda [49]. O fenómeno de transferência de calor pode ser observado na Figura 3.3.

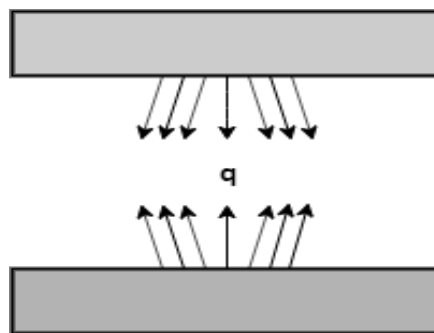


Figura 3.3 - Trocas de calor por radiação entre duas superfícies

Resumidamente, a radiação traduz-se na emissão de ondas eletromagnéticas de um corpo aquecido, que se transformam em energia térmica após serem absorvidas por um recetor [36].

Quando existem trocas de calor por radiação entre dois corpos, o fluxo máximo de energia sob forma de calor transmitida entre os dois corpos é proporcional à diferença das potências de quarta ordem das temperaturas em que se encontram os corpos, sendo que a transmissão de calor é considerada máxima no vácuo [49]. Esse fluxo máximo de calor, Q , emitido por um corpo negro, pode ser calculado pela lei de Stefan-Boltzmann da radiação térmica, de acordo com a equação 3.7.

$$Q = \sigma A(\theta_1^4 - \theta_2^4) \quad (3.7)$$

Em que:

σ - Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$);

θ_1 - Temperatura do corpo 1 [K];

θ_2 - Temperatura do corpo 2 [K].

A equação 3.7 não é válida para a grande parte dos corpos reais. Tal como referido, esta equação só é válida para corpos negros. Corpos esses que representam uma idealização física de um corpo (superfície) que absorve toda a radiação eletromagnética. De facto, o corpo negro é um irradiador ideal, isto é, emite energia de acordo com a quarta potência da temperatura [49]. A denominação de corpo negro surge devido à aproximação das superfícies negras a este comportamento. Qualquer superfície, como, por exemplo uma superfície metálica polida, não emite nem absorve a mesma quantidade de energia como um corpo negro. No entanto, estes corpos, denominados de corpos cinzentos, emitem uma radiação total proporcional à potência à quarta da temperatura.

Desta forma, surge o conceito de emissividade que traduz a maior ou menor capacidade de uma superfície cinzenta em emitir ou absorver radiação como uma superfície negra ideal. Também deve ser tido em conta o facto de a radiação eletromagnética se propagar segundo linhas retas, o que origina perdas para o ambiente envolvente, já que nem toda a radiação emitida por uma superfície atinge outra superfície [49].

Tendo em consideração, os todos os fatores mencionados anteriormente, o fluxo de calor transmitido por radiação, q , entre dois corpos, é dado pela equação 3.8.

$$q = h_r(\theta_1 - \theta_2) \quad (3.8)$$

Em que h_r é coeficiente de transmissão de calor por radiação, e deve ser calculado, em função da emissividade, pela equação 3.9.

$$h_r = \varepsilon \sigma (\theta_1 + \theta_2)(\theta_1^2 + \theta_2^2) \quad (3.9)$$

Em que ε é a emissividade da superfície e o seu valor deve ser compreendido entre zero e a unidade.

A radiação térmica, a par da convecção, é um fenómeno com bastante relevo no estudo de estruturas em situação de incêndio, pois é o principal mecanismo de transferência de calor das chamas para a superfície dos materiais combustíveis, do fumo para os elementos estruturais e da estrutura submetida ao fogo para a adjacente [9]. Desta forma, para o cálculo do fluxo de total de calor por radiação e convecção simultânea é representado pela equação 3.10.

$$q_{rc} = h_c(\theta - \theta_\infty) + h_r(\theta_1 - \theta_2) \quad (3.10)$$

CURVAS DE INCÊNDIO NOMINAIS

- 4.1 CURVA DE INCÊNDIO PARA ELEMENTOS EXTERIORES
- 4.2 CURVA DE INCÊNDIO ISO 834
- 4.3 CURVA DE INCÊNDIO DE HIDROCARBONETOS

4 CURVAS DE INCÊNDIO NOMINAIS

O fogo é considerado uma manifestação química que dá resposta à existência simultânea de uma fonte de calor, de um combustível e de um comburente (oxigênio). Este ocorre quando existe uma combinação entre estes fatores que resulte num aquecimento suficiente de forma a gerar combustão e a sua forma de propagação varia com diversos fatores, tais como a ventilação, o estado físico do combustível e a existência de compartimentos [52].

De acordo com a literatura, a combustão de material orgânico é uma reação química que envolve a oxidação de hidrocarbonetos de modo a produzir vapor de água e dióxido de carbono [9]. A combustão apenas requer a existência de uma fonte de calor até se atingir o ponto de ignição. A partir deste ponto, existe um elevado crescimento da chama até se tornar estável. Neste momento, a chama já consegue manter a reação de combustão sem necessitar de uma fonte de calor externa.

Após ser atingido o ponto de ignição, a segurança da estrutura depende da velocidade de propagação do incêndio pelos materiais combustíveis, que consequentemente depende das correntes de ar por convecção, da localização, do tamanho das chamas, das propriedades térmicas e da inflamabilidade do material combustível [53].

Na literatura é possível encontrar diversas metodologias e procedimentos para modelar o comportamento de um incêndio em condições reais, como a curva de incêndio real e os vários modelos nominais propostos por normas.

Os modelos de incêndio nominais são curvas de temperatura-tempo definidas por equações simples e que não dependem de parâmetros físicos, como acontece com outros tipos de curvas de incêndio, nem de dimensões ou tipo do edifício [5]. É de notar que não possuem fase de ignição nem de extinção ou de arrefecimento.

Neste capítulo, são dados a conhecer os três modelos de curvas nominais propostas pelo Eurocódigo 1 - Parte 1-2 [54]: curva para Elementos Exteriores, curva ISO 834 e curva de Hidrocarbonetos.

4.1 CURVA DE INCÊNDIO PARA ELEMENTOS EXTERIORES

A curva nominal de incêndio de Elementos Exteriores é usada para elementos estruturais que constituem a parte resistente e que se encontram no exterior da estrutura, e que são expostos diretamente ao fogo [5]. É possível observar nos exemplos na Figura 4.10. Esta curva é a menos severa de todas.

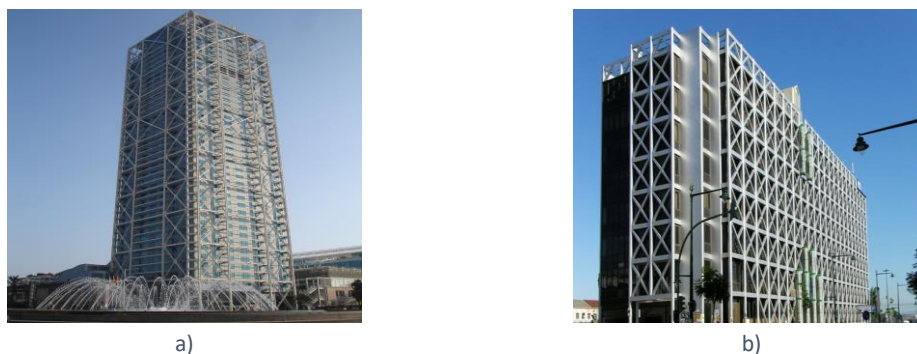


Figura 4.1 - Edifícios com elementos estruturais exteriores. a) Hotel Arts em Barcelona [55] e b) Edifício IADE em Lisboa [56]

De acordo com o Eurocódigo 1 - Parte 1-2 [54], a temperatura dos gases quentes para a curva nominal de elementos exteriores é dada pela equação 4.1 e a sua evolução pode ser observada na Figura 4.2.

$$\theta_g(t) = 20 + 660(1 - 0,687e^{0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) \quad (4.1)$$

Em que:

θ_g - Temperatura dos gases no compartimento do incêndio [°C];

t - Tempo decorrido do incêndio [min].

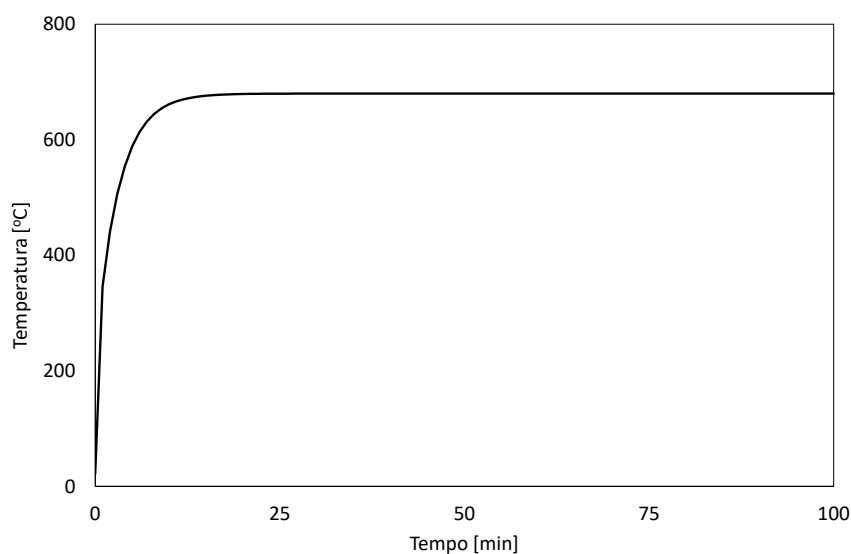


Figura 4.2 - Evolução da curva nominal de incêndio para Elementos Exteriores

4.2 CURVA DE INCÊNDIO PADRÃO ISO 834

A curva ISO 834, embora bastante afastada da realidade de um incêndio, é a mais utilizada no passado e continua a ser atualmente em programas da especialidade e em ensaios experimentais em fornos de diversos países [57]. Esta curva apresenta apenas um ramo ascendente, admitindo que a temperatura é sempre crescente com o tempo, pois não depende das características do ambiente ou da carga de incêndio, e é usada principalmente para representar um incêndio completamente desenvolvido num compartimento.

De acordo com a norma ISO 834-1:1999 [58], que serviu de base para a curva de incêndio padrão do Eurocódigo 1 Parte 1-2 [54], a temperatura dos gases quentes é dada pela equação 4.2 e a sua representação gráfica pode ser observada na Figura 4.3.

$$\theta_g(t) = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (4.2)$$

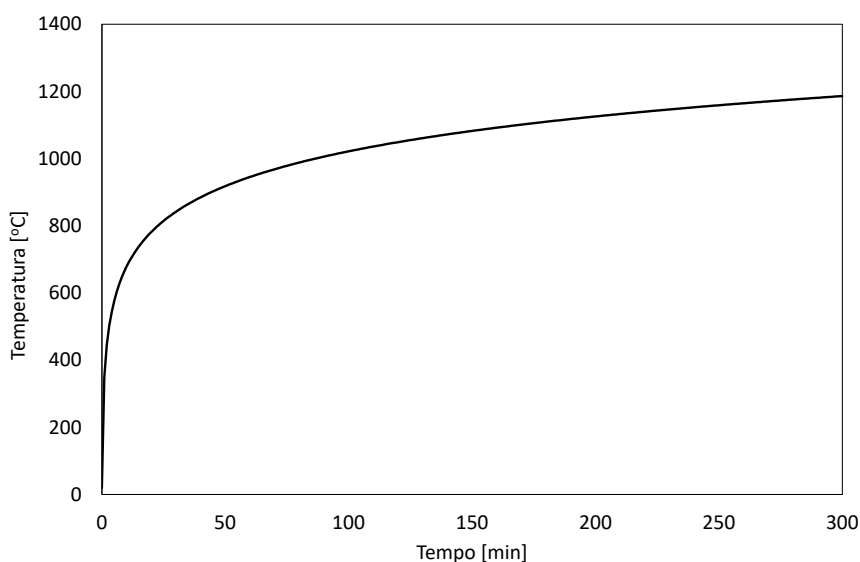


Figura 4.3 - Evolução gráfica da curva nominal de incêndio ISO 834

4.3 CURVA DE INCÊNDIO DE HIDROCARBONETOS

Esta curva de incêndio é sobretudo utilizada no projeto de armazéns industriais, de túneis ou quando o combustível principal do incêndio seja hidrocarbonetos (petróleo, gás natural, solventes plásticos, etc.) [57]. Um incêndio que foi dirigido por esta curva, ocorreu a 11 de setembro de 2001, após o embate de dois aviões nas torres do *World Trade Center* em Nova York. Este incêndio provocou o colapso total desses edifícios, como mostra a Figura 4.4.



a)

b)

Figura 4.4 - Incêndio do *World Trade Center*.
a) Início do Incêndio [59] e b) Colapso das torres [59].

Ao contrário da curva padrão ISO 834, que a temperatura dos gases aumenta progressivamente ao longo tempo, nesta curva aumenta bruscamente, demorando cerca de trinta minutos até atingir os 1100°C e permanecendo constante a partir desse momento, tal como é demonstrado na Figura 4.5. Esta curva de incêndio é a mais severa das curvas nominais e segundo o Eurocódigo 1 Parte 1-2 [54], a temperatura dos gases quentes de um incêndio regido pela curva de hidrocarbonetos é dada pela equação 4.3.

$$\theta_g(t) = 20 + 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{2,5t}) \quad (4.3)$$

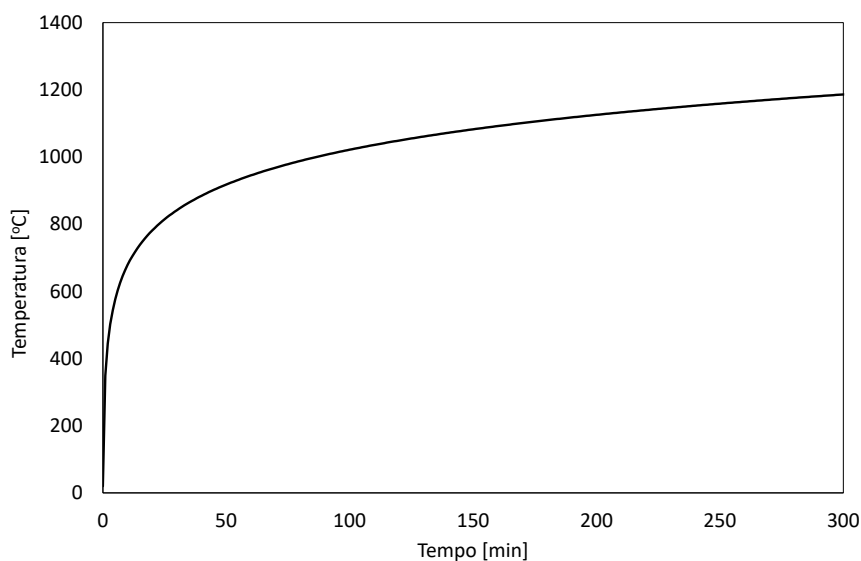


Figura 4.5 - Evolução gráfica da curva nominal de incêndio de hidrocarbonetos

PERFIS EM AÇO NÃO PROTEGIDOS

- 5.1 MÉTODO SIMPLIFICADO PROPOSTO PELO EUROCÓDIGO 3
- 5.2 MÉTODO DA CAPACITÂNCIA GLOBAL
- 5.3 MÉTODO DE CÁLCULO AVANÇADO

5 PERFIS EM AÇO NÃO PROTEGIDOS

O cálculo da distribuição de temperaturas na secção transversal de um perfil em aço requer, não só a caracterização da ação térmica, mas também o conhecimento da variação das propriedades térmicas do material que o constitui em função do aumento da temperatura. Assim como a resolução de um problema de transferência de calor com condições de fronteira devidamente identificadas [55-56].

No presente capítulo serão apresentadas as metodologias e conceitos necessários para a obtenção da distribuição de temperaturas na secção transversal de perfis em aço não protegidos, quer recorrendo a métodos simplificados, quer a métodos de cálculo avançado.

Os métodos simplificados de cálculo possibilitam obter a evolução uniforme da temperatura na secção transversal do elemento estrutural em função do incremento de tempo. Estes métodos estão principalmente presentes em normas através de equações simples e valores tabelados.

Os métodos avançados de cálculo possuem, normalmente, como base o MDF ou MEF. Estes são capazes de calcular o campo de temperaturas na secção transversal do elemento estrutural durante o processo de aquecimento com elevada exatidão. A aplicação destes métodos requer o uso de meios computacionais devido à complexidade numérica característica à resolução do problema.

No que diz respeito aos métodos simplificados, apresentam-se, inicialmente, as equações propostas pelos Eurocódigos 1 e 3 nas suas partes 1-2, para a determinação da evolução da temperatura uniforme na secção transversal de perfis em aço não protegidos em função do incremento de tempo. Também é apresentado o Método da Capacitância Global que constitui um método simples e de fácil execução, idealizado para corpos com um comportamento térmico quase uniforme durante o processo de transferência de calor. Este método, através de equações simplificadas da transferência de calor, permite obter a evolução da temperatura na secção transversal do perfil em aço em função do tempo.

Relativamente ao método de cálculo avançado, é realizada uma breve abordagem à equação de condução de calor, às suas condições fronteira e à sua discretização por elementos finitos. Seguidamente, apresenta-se uma descrição do programa de elementos finitos utilizado, *ANSYS® Academic Student R3*, assim como dos parâmetros e funcionalidades utilizadas para a realização das simulações numéricas.

5.1 MÉTODO SIMPLIFICADO PROPOSTO PELO EUROCÓDIGO 3

Os Eurocódigos constituem um conjunto de normas, atualmente em vigor na Europa, que tem como principal objetivo a uniformização de processos, técnicas e produtos de construção relativos ao projeto de estruturas [6].

O método preconizado pelo Eurocódigo 3 - Parte 1-2 [34], para a realização da análise térmica de perfis em aço é totalmente analítico. No entanto, existem algumas simplificações que devem ser realizadas. Este método apenas considera elementos estruturais isolados, desconsiderando a estrutura envolvente e tendo unicamente em conta o aumento uniforme da temperatura em toda a secção.

Esta simplificação está relacionada com o fator de massividade ou de forma. Este fator de massividade, para elementos não protegidos, é calculado através da relação entre a área da superfície do elemento por unidade de comprimento, A_m , e o volume por unidade de comprimento, V , de acordo com a equação 5.1. Este é um fator fundamental no cálculo do perfil da temperatura nos perfis em aço, já que o incremento de temperatura é diretamente proporcional a esta grandeza:

$$\frac{A_m}{V} \text{ (m}^{-1}\text{)} \quad (5.1)$$

No entanto, o Eurocódigo restringe a utilização do Método Simplificado para elementos com um fator de massividade inferior a 10 m^{-1} . Isto acontece, uma vez que, para perfis com valor de fator de massividade superior a este, não é possível considerar uma distribuição de temperaturas uniforme ao longo da secção transversal do elemento.

Para barras prismáticas, tal como todos os tipos de perfis estudados nesta dissertação, a equação para o cálculo do fator de massividade apresentada a cima pode ser simplificada, resultando na relação entre o perímetro da secção exposta ao fogo, P , e área da secção exposta ao fogo, A , [5]. Esta simplificação é apresentada na equação 5.2.

$$\frac{A_m}{V} = \frac{P \times L}{A \times L} = \frac{P}{A} \text{ (m}^{-1}\text{)} \quad (5.2)$$

Em que L é o comprimento do elemento.

No Eurocódigo 3 - Parte 1-2 é apresentado uma tabela (quadro 4.2) [34], que fornece fórmulas para o cálculo do fator de massividade para diferentes tipos de perfis de secções, em diferentes tipos de exposições ao fogo. No entanto, este não cobre todas as situações possíveis reais de exposição ao fogo de elementos estruturais. Na Tabela 5.1 são apresentadas as fórmulas para o cálculo do fator de massividade.

Tabela 5.1 - Fórmulas para cálculo do fator de massividade de acordo com o Eurocódigo 3 - Parte 1-2 [34]

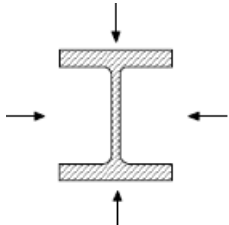
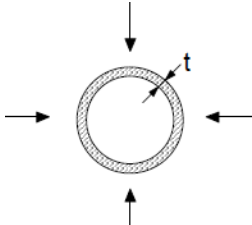
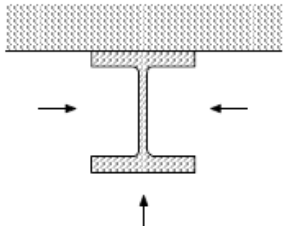
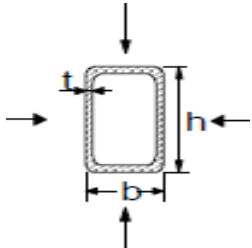
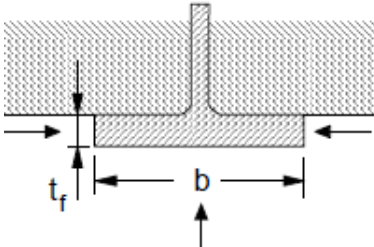
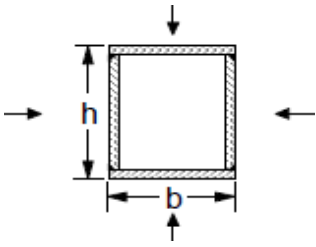
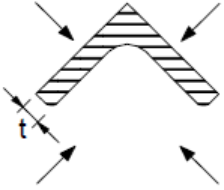
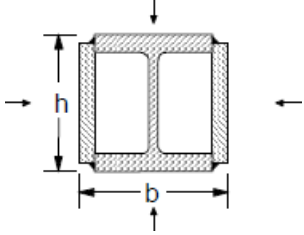
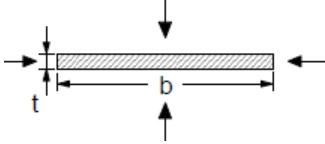
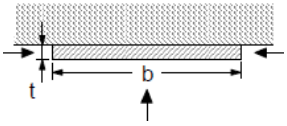
<p>Secção aberta exposta ao fogo em todos os lados</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{perímetro}}{\text{área da secção transversal}}$ 	<p>Tubo exposto ao fogo em todos os lados</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{1}{t}$ 
<p>Secção aberta exposta ao fogo em três lados</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{superfície exposta ao fogo}}{\text{área da secção transversal}}$ 	<p>Secção tubular (ou secção em caixão soldada de espessura uniforme) exposta ao fogo em todos os lados</p> <p>Se $t \ll b$: $\frac{A_m}{V} \approx \frac{1}{t}$</p> 
<p>Banzo de secção em I exposto ao fogo em três lados</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{b + 2t_f}{b \times t_f}$ <p>Se $t \ll b$: $\frac{A_m}{V} \approx \frac{1}{t_f}$</p> 	<p>Secção em caixão soldada exposta ao fogo em todos os lados</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b + h)}{\text{área da secção transversal}}$ <p>Se $t \ll b$: $\frac{A_m}{V} \approx \frac{1}{t}$</p> 

Tabela 5.2 - Fórmulas para cálculo do fator de massividade de acordo com o Eurocódigo 3 - Parte 1-2 [34] (continuação)

<p>Cantoneira exposta ao fogo em todos os lados</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2}{t}$ 	<p>Secção em I com reforço em caixão, exposta ao fogo em todos os lados</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{área da secção transversal}}$ 
<p>Barra plana exposta ao fogo em todos os lados</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{b+2t}{b \times t}$ <p>Se $t \ll b$: $\frac{A_m}{V} \approx \frac{2}{t}$</p> 	<p>Barra plana exposta ao fogo em três lados</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{b+2t}{b \times t}$ <p>Se $t \ll b$: $\frac{A_m}{V} \approx \frac{1}{t}$</p> 

É necessário ter especial atenção ao termo “massividade” já que este pode induzir em erro, uma vez que o valor é tanto maior quanto menor for a espessura do elemento estrutural. Isto é, para um perfil em aço com uma espessura elevada o seu valor de massividade será pequeno, já um perfil com pequena espessura terá uma massividade elevada.

Nesta dissertação foram estudados os perfis IPE, HEM, L e UAP presentes no catálogo da *Arcelor Mittal* [62]. Na Figura 5.1 é apresentada a tipologia de perfis utilizados.

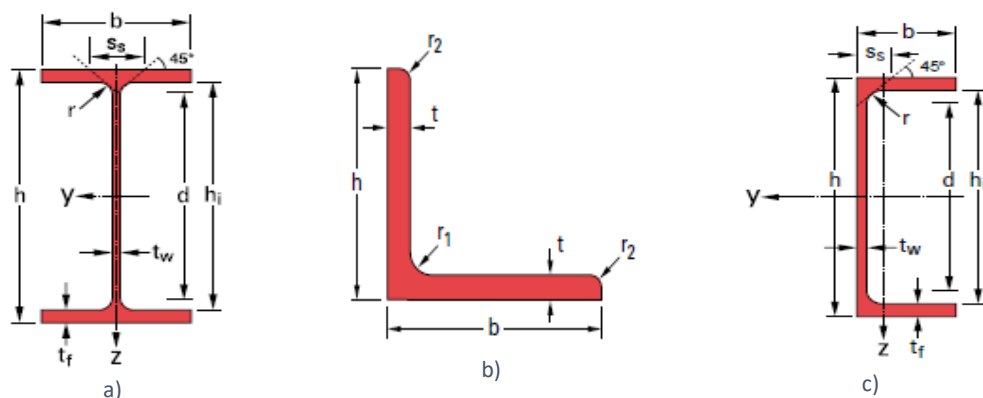


Figura 5.1 – Dimensões dos perfis em aço selecionados [62]. a) IPE/HEM, b) L e c) UAP

Tal como referido as gamas de perfis estudadas podem ser consideradas como barras prismáticas, sendo deste modo possível aplicar a equação 5.2 para o cálculo do fator de massividade. Na Tabela 5.3 são apresentadas expressões deduzidas para o cálculo do fator de massividade destes perfis, de acordo com as suas dimensões.

Tabela 5.3 - Equações para o cálculo do fator de massividade dos perfis estudados

Perfil	Expressão [m^{-1}]
IPE/HEM	$\frac{A_m}{V} = \frac{P}{A} = \frac{4b + 2d + 4t_f - 2t_w - 4r + 2\pi r}{h \times t_w + 2(b \times t_f) - 2(t_f \times t_w) + 4r^2 - \pi r^2}$
L	$\frac{A_m}{V} = \frac{P}{A} = \frac{2h + 2b + 2r_1 - 4r_2 + 2t + \frac{\pi r_1^2}{2} + \pi r_2}{h \times t + b \times t - \frac{\pi r_1^2}{4} + \frac{\pi r_2^2}{2} + r_1^2 - 2r_2^2 - t^2}$
UAP	$\frac{A_m}{V} = \frac{P}{A} = \frac{h + d + 4b + t_f + 2r + 2t_f - 2t_w + \pi r}{h \times t_w + 2(b \times t_f) - 2(t_f \times t_w) - \frac{\pi r^2}{2} + 2r^2}$

No Anexo 1 são apresentadas tabelas com os valores calculados do fator de massividade para os perfis estudados.

Derivado ao facto de o aço ser um material com condutibilidade térmica elevada, o Eurocódigo 3, Parte 1-2 [34] considera que a distribuição de temperaturas na secção transversal de um perfil em aço é uniforme. Desta forma, a equação de condução de calor apresentada no capítulo 3 (equação 3.3) pode ser simplificada devido à ausência de gradientes térmicos na secção transversal do perfil. Assim, segundo o Eurocódigo 3, Parte 1-2, o incremento de temperatura, $\Delta\theta_{a,t}$, num perfil de aço não protegido durante um intervalo de tempo, Δt , deve ser obtido através da equação 5.3.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad (5.3)$$

Em que:

- k_{sh} - Fator adimensional de correção para o efeito de sombra;
- A_m/V - Fator de massividade ou de forma [m^{-1}];
- c_a - Calor específico do aço, definido no capítulo 2 [J/kgK];
- ρ_a - Massa volúmica do aço, definida no capítulo 2 [kg/m³];
- $\dot{h}_{net,d}$ - Fluxo de calor efetivo por unidade de área [W/m²];
- Δt - Intervalo de tempo [s].

O fator de correção para o efeito de sombra, K_{sh} , pode ser calculado segundo o Eurocódigo 3, Parte 1-2 [34], de acordo com as expressões presentes na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Expressões para o cálculo do fator de correção para o efeito de sombra

Secção em I sujeitas à ação de um fogo nominal	Restantes casos de exposição ao fogo
$k_{sh} = 0,9 \frac{[A_m/V]_b}{[A_m/V]}$	$k_{sh} = \frac{[A_m/V]_b}{[A_m/V]}$

Em que $[A_m/V]_b$ é o fator de massividade calculado como se o perfil estivesse protegido em caixão.

O Eurocódigo ainda refere em nota, que para secções ocas retangulares ou circulares envolvidas pelo fogo, o fator K_{sh} deve ser considerado igual à unidade. Também é mencionado que desconsiderar o efeito de sombra no perfil conduz a resultados conservativos.

Em 2001, L. Tewilt, *et al.* [63] descreveram o efeito de correção para o efeito de sombra como um coeficiente empírico, que foi essencialmente introduzido na equação 5.3 de forma a que valores como a emissividade do elemento ou do fogo, sejam realistas e obtidos por ensaios experimentais possam ser utilizados. Para J. -M. Franssen [57], este fator é uma média ponderada do fator de vista. No entanto, nesta dissertação foi considerado o valor para o fator de correção para o efeito de sombra igual à unidade.

O fluxo de calor efetivo por unidade de área, $\dot{h}_{net,d}$, é dado pelo somatório do fluxo de calor efetivo por condução, $\dot{h}_{net,c}$, e pelo fluxo de calor efetivo de radiação, $\dot{h}_{net,r}$. Este é apresentado no Eurocódigo 1 - Parte 1-2 [54], sendo dado pela equação 5.4.

$$\dot{h}_{net,d} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad [\text{W/m}^2] \quad (5.4)$$

O fluxo de calor efetivo por convecção, por unidade de área, deve ser determinado, segundo o Eurocódigo 1 – Parte 1-2 [54], pela expressão 5.5.

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad [\text{W/m}^2] \quad (5.5)$$

Em que:

α_c - Coeficiente de transferência de calor por convecção $[\text{W/m}^2\text{K}]$;

θ_g - Temperatura dos gases quentes na proximidade do elemento estrutural $[\text{°C}]$;

θ_m - Temperatura da superfície do elemento estrutural $[\text{°C}]$.

Segundo o Eurocódigo 1 – Parte 1-2 [54], o coeficiente de transferência de calor por convecção pode tomar diferentes valores, tendo em conta o tipo de exposição ao fogo que o elemento estrutural está sujeito. Na Tabela 5.5 são apresentados todos os coeficientes de transferência de calor por radiação preconizados pelo Eurocódigo 1 – Parte 1-2.

Tabela 5.5 - Coeficientes de transferência de calor por convecção [54]

Superfície exposta ao fogo segundo uma curva de incêndio nominal	
Curva de incêndio nominal ISO 834	25 [W/m ² K]
Curva de incêndio nominal para Elementos Exteriores	25 [W/m ² K]
Curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos	50 [W/m ² K]
Superfície não exposta ao fogo	
Quando se admite transferência de calor por radiação	9 [W/m ² K]
Transferência de calor por radiação considerada separadamente	4 [W/m ² K]

A componente de fluxo de calor efetivo por radiação, por unidade de área da superfície, deve ser calculada pela equação 5.6, segundo o Eurocódigo 1 – Parte 1-2 [54].

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \times \varepsilon_f \times \varepsilon_m \times \sigma \times [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m - 273)^4] \quad [\text{W/m}^2] \quad (5.6)$$

Em que:

Φ - Fator de vista;

ε_f - Emissividade do incêndio, geralmente tomada como igual à unidade;

ε_m - Emissividade da superfície do elemento estrutural em estudo, sendo que para o aço foi considerado o valor de 0,7, segundo o Eurocódigo 3 – Parte 1-2 [34];

σ - Constante de Stephan-Boltzman, com valor igual a $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$;

θ_r - Temperatura de radiação efetiva na envolvente do elemento estrutural em estudo, que no caso de elementos totalmente envolvidos pelo fogo a temperatura de radiação pode ser considerada igual à temperatura dos gases quentes de incêndio ($\theta_r = \theta_g$) [°C].

O fator de vista, segundo as especificações do Eurocódigo 1 – Parte 1-2 [54] pode ser considerado como unitário (conservador). Alternativamente, pode optar-se por um valor inferior de forma a considerar os efeitos de sombra e de posição. Este é definido como a relação entre o calor por radiação que uma superfície imite e o calor que chega a uma dada superfície recetora. No Anexo G do Eurocódigo 1 – Parte 1-2 [54], são apresentados os procedimentos para a determinação deste fator. Nesta dissertação este fator foi considerado igual à unidade, uma vez que se optou pelo lado conservativo do método.

Relativamente ao intervalo de tempo, Δt , o Eurocódigo 3 – Parte 1-2 [34] preconiza a utilização de um intervalo igual ou inferior a cinco segundos ($\Delta t \leq 5 \text{ s}$). Com o objetivo de perceber qual o intervalo que dirigia a menores erros, realizou-se um estudo numa folha de cálculo em *Excel*. Deste modo, considerou-se que o intervalo de tempo mínimo a utilizar seria $\Delta t = 0,5 \text{ s}$ e estudaram-se os intervalos $\Delta t = 1 \text{ s}$, $\Delta t = 2 \text{ s}$, $\Delta t = 3 \text{ s}$, $\Delta t = 4 \text{ s}$ e $\Delta t = 5 \text{ s}$. De forma a tentar perceber o porquê desta restrição também se estudou para $\Delta t = 10 \text{ s}$ e $\Delta t = 20 \text{ s}$. Na Figura 5.2 está representada a evolução do erro relativo em função do tempo decorrido de incêndio para cada intervalo de tempo em relação a $\Delta t =$

0,5 s. Este estudo foi realizado para um perfil IPE 400, exposto ao fogo nos quatro lados segundo a curva de incêndio nominal ISO 834.

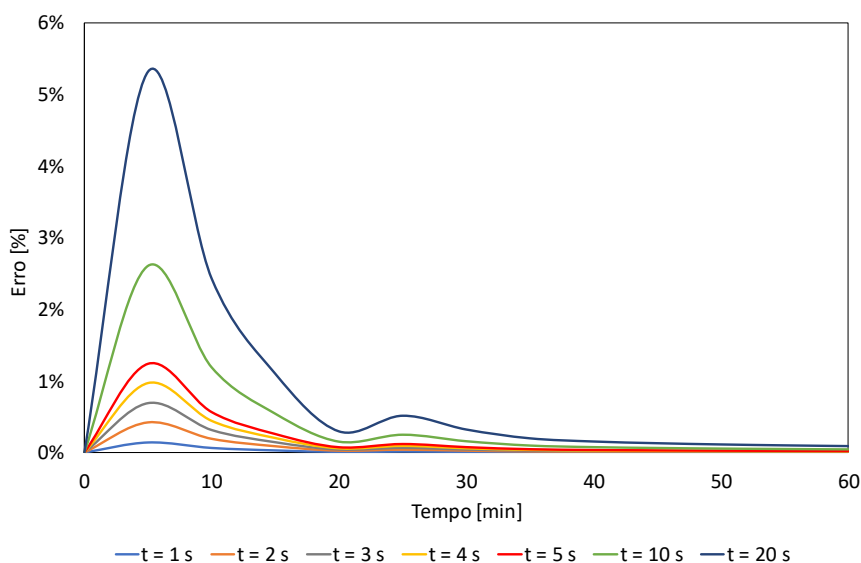


Figura 5.2 - Erro da variação do intervalo de tempo para o Método Simplificado para um perfil de aço IPE 400

Analisando a Figura 5.2 é possível verificar que o Método Simplificado proposto pelo Eurocódigo 3 é bastante suscetível à variação do tempo nos primeiros 15 minutos, o que inviabiliza a utilização de intervalos de tempo superiores a cinco segundos. No entanto, a partir dos 30 minutos o intervalo de tempo selecionado não produz grande efeito nos resultados obtidos uma vez que para todos os intervalos de tempo estudados o seu erro é quase nulo.

Contudo, selecionou-se, para a resolução deste método, um intervalo de tempo de cinco segundos ($\Delta t = 5$ s), já que o erro obtido é inferior a 1% para praticamente todo o tempo de exposição ao fogo.

O Método Simplificado proposto pelo Eurocódigo 3 foi executado numa folha de cálculo *Excel* para perfis em aço IPE, HEM, L e UAP. Os resultados serão discutidos à frente e também apresentados no Anexo 2. Ainda foram criados ábacos de resistência ao fogo em função do fator de massividade do perfil que podem ser consultados no Anexo 3.

5.2 MÉTODO DA CAPACITÂNCIA GLOBAL

Grande parte dos problemas da transferência de calor dependem do tempo. Estes problemas são designados de transientes ou não estacionários e verificam-se quando as condições de fronteira de um sistema são alteradas com o tempo. Num sistema quando a temperatura é alterada num ponto, a temperatura dos restantes pontos que constituem o sistema também se altera em função do tempo até que ocorra uma distribuição uniforme de os pontos do sistema [35,48,63].

Existem sólidos que possuem um comportamento térmico praticamente uniforme durante todo o processo de transferência de calor para qualquer instante de tempo durante o processo de aquecimento transiente, sendo desta forma possível desprezar os gradientes de temperatura existentes nesse sólido. Assim, análises térmicas de sólidos que possuem este tipo de idealização, podem ser executadas através do Método da Capacitância Global [61-62].

Como referido nesta dissertação, o aço é um material com uma condutibilidade térmica elevada, pelo que é um ótimo candidato à utilização deste método para a realização da análises térmicas em situação de incêndio [21,63,66].

Ao impor tais simplificações, não é possível analisar este processo através da equação geral de condução de calor. Desta forma, a resposta transiente da temperatura é dada pela equação de equilíbrio de energia no sólido. Esta equação relaciona a variação de energia com a energia que sai do sólido por convecção [36].

$$\Delta E_{\text{interna}} = E_{\text{sai}} \quad (5.7)$$

Ou seja,

$$\rho V c_a \frac{dT}{dt} = -hA(T(t) - T_{\infty}) \quad (5.8)$$

Adotando que $\theta(t) = T(t) - T_{\infty}$ e $\frac{d\theta}{dt} = \frac{dT}{dt}$ se T_{∞} for uma constante, tem-se que:

$$\rho V c_a \frac{d\theta}{dt} = -hA\theta \Leftrightarrow \frac{d\theta}{\theta} = -\frac{hA}{\rho V c_a} dt \quad (5.9)$$

Considerando as condições iniciais de tempo e temperatura $t=0$ e, $T(0)=T_i$ e seguidamente integrando a equação 5.9, é possível obter a equação 5.10:

$$\begin{aligned} \int_{\theta_i}^{\theta} \frac{1}{\theta} d\theta &= -\int_0^t \frac{hA}{\rho V c_a} dt \Leftrightarrow \ln \theta - \ln \theta_i = -\frac{hA}{\rho V c_a} t \\ \Rightarrow \ln \frac{\theta}{\theta_i} &= -\frac{hA}{\rho V c_a} t \\ \Rightarrow \frac{\theta(t)}{\theta_i} &= \frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = e^{-\frac{hA}{\rho V c_a} t} \end{aligned} \quad (5.10)$$

De forma a desenvolver este método apropriadamente, é necessário determinar sob quais as condições a que este pode ser aplicado com uma precisão adequada. Assim, é introduzido o conceito do número de Biot, Bi . Este fator é uma grandeza adimensional de transferência de calor que é definido como o rácio entre a resistência térmica de convecção e de condução. Ou seja, este fator mede a capacidade de se transmitir calor

por convecção face à condução [35,48]. O cálculo do número de Biot é dado pela equação 5.11.

$$Bi = \frac{h_{cr} L_c}{\lambda_a} \quad (5.11)$$

Em que:

h_{cr} - Coeficiente de transferência de calor por convecção e radiação [W/m^2K];

L_c - Comprimento característico [m];

λ_a - Condutibilidade térmica do aço [W/mK], estudado no capítulo 2.

Originalmente, o número de Biot apenas tem em consideração o efeito da convecção. No entanto para o cálculo do perfil de temperaturas na secção transversal de perfis em aço submetidos à ação do fogo é necessário considerar o efeito da radiação, uma vez que este é o principal fenómeno de transferência de calor envolvido num incêndio. Este fenómeno é o responsável pela transferência de calor das chamas para a superfície dos materiais combustíveis, do fumo para os elementos estruturais e da estrutura submetida ao incêndio para a adjacente [9]. Desta forma, é especialmente importante considerar o coeficiente de transferência de calor por convecção e radiação, que é dado pela equação 5.12.

$$h_{cr} = h_c + h_r \quad (5.12)$$

Em que:

h_c - Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m^2K];

h_r - Coeficiente de transferência de calor por radiação [W/m^2K], que pode ser calculado pela expressão 3.9.

O comprimento característico, L_c , em metros, para perfis em aço em situação de incêndio é dado pelo rácio entre o volume do perfil do sólido em estudo e a área do perfil exposta ao fogo ou pelo inverso do fator de massividade [31]. Tal como o fator de massividade, para barras prismáticas, o comprimento característico pode ser simplificado de acordo com a expressão 5.13.

$$L_c = \left(\frac{A_m}{V} \right)^{-1} = \frac{V}{A} = \frac{A \times L}{P \times L} = \frac{A}{P} \quad (5.13)$$

Em que A é a área da secção transversal do perfil de aço, P é o perímetro da secção transversal do perfil de aço e L é o comprimento.

Mais concretamente, o número de Biot mede a diferença de temperaturas no interior do sólido em relação à diferença de temperaturas entre a superfície do sólido e a da vizinhança. Ou seja, quanto menor o número de Biot menor essa diferença de temperaturas e mais uniforme o campo de temperaturas no interior do sólido. Desta

forma, é possível considerar uma distribuição de temperaturas uniforme para toda a secção transversal do sólido quando o valor do número de Biot é muito menor que a unidade ($Bi \ll 1$). É providencial que apenas se utilize o Método da Capacitância Global quando é verificada esta condição [65-67]. A Figura 5.3 apresenta a evolução do valor do número de Biot em função da temperatura, segundo a curva nominal ISO 834, para alguns dos perfis em aço estudados.

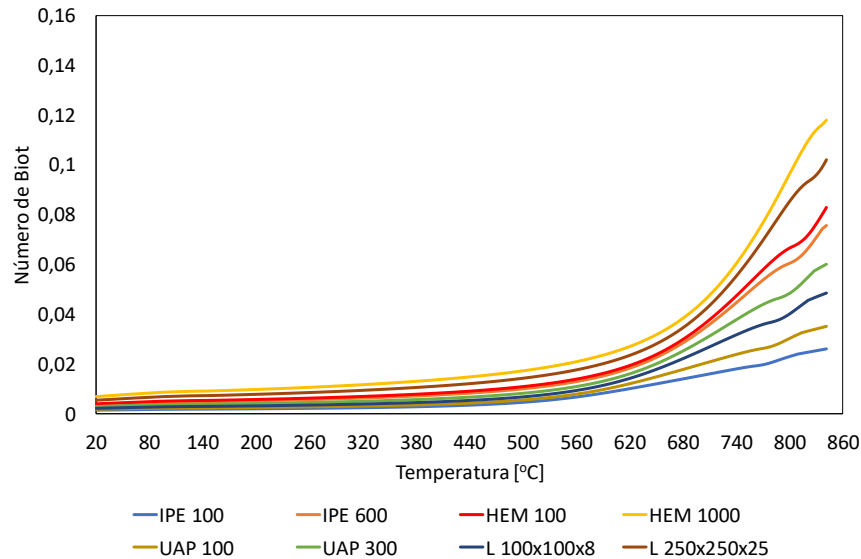


Figura 5.3 - Número de Biot para perfis em aço em função do aumento da temperatura de incêndio

Como é possível verificar na Figura 5.3 todos os perfis estudados verificam a condição do número de Biot ($Bi \ll 1$). Desta forma é possível concluir que os perfis em aço são ótimos candidatos à aplicação do Método da Capacitância Global.

Seguidamente, ao introduzir o número de Biot no expoente da equação 5.10 é possível obter a expressão 5.14.

$$\frac{hA}{\rho V c_a} t = Bi \cdot Fo \quad (5.14)$$

Onde Fo é o número de Fourier. Este número é adimensional e mede o calor conduzido através de um sólido em relação ao calor armazenado [64]. O seu valor é dado pela expressão 5.15.

$$Fo = \frac{\lambda_a}{\rho_a c_a L_c^2} t = \frac{\alpha}{L_c^2} t \quad (5.15)$$

Em que:

α - Difusibilidade térmica do aço [m^2/s], estudado no capítulo 2;

t - Tempo decorrido desde a temperatura inicial até à temperatura em estudo [$^{\circ}C$].

À semelhança do Método Simplificado proposto pelo Eurocódigo 3, estudou-se qual o intervalo de tempo a utilizar e a sensibilidade do método à utilização de grandes intervalos de tempo. Assim, numa folha de cálculo *Excel*, considerando que o intervalo de tempo mínimo a utilizar seria $\Delta t = 0,5$ s, estudaram-se os intervalos $\Delta t = 1$ s, $\Delta t = 2$ s, $\Delta t = 3$ s, $\Delta t = 4$ s, $\Delta t = 5$ s, $\Delta t = 10$ s, $\Delta t = 20$ s e $\Delta t = 100$ s. Na Figura 5.4 é apresentado o erro relativo em função do tempo de incêndio para cada um dos intervalos de tempo mencionados para um perfil IPE 400 sujeito à curva normalizada de incêndio ISO 834 nos quatro lados.

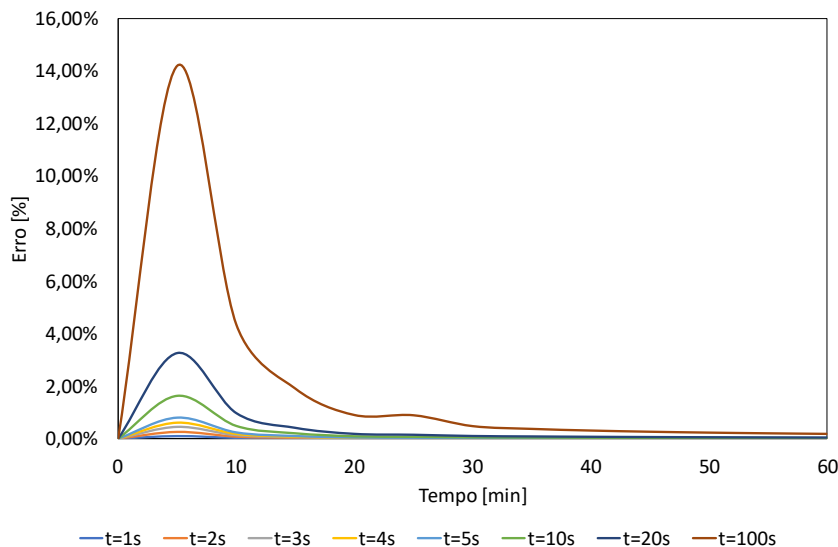


Figura 5.4 - Erro da variação do intervalo de tempo para o Método da Capacitância Global em função do tempo para um perfil de aço IPE 400

Comparando os erros obtidos para o Método da Capacitância Global com os obtidos para o Método Simplificado do Eurocódigo 3, é possível afirmar que o Método da Capacitância Global possui menor sensibilidade à utilização de maiores intervalos de tempo. Para intervalos de tempo inferiores a 30 min, este método provoca erros pouco significativos, ao contrário do Método Simplificado preconizado pelo Eurocódigo 3. No entanto, o intervalo de tempo $\Delta t = 100$ s gera erros bastantes significativos, sendo possível concluir que a utilização de intervalos de tempo tão elevados inviabiliza a utilização deste método. Ainda assim, nesta dissertação utilizou-se $\Delta t = 5$ s, o mesmo que o utilizado no Método do Eurocódigo 3.

Desta forma, a equação 5.10 pode ser simplificada de acordo com a equação 5.16.

$$T(t) = (T_i - T_\infty)e^{-Bi.Fo} + T_\infty \quad (5.16)$$

Em que:

$T(t)$ - Temperatura do aço no instante t [°C];

T_i - Temperatura inicial do aço [°C];

T_∞ - Temperatura dos gases quentes de incêndio [°C].

O Método da Capacitância Global foi utilizado para o cálculo do perfil de temperaturas dos perfis em aço IPE, HEM, UAP e L sujeitos à ação do fogo segundo as três curvas nominais de incêndio. A resolução deste método foi executada numa folha de cálculo *Excel*. Os resultados obtidos serão comparados com o Método Simplificado proposto pelo Eurocódigo 3, de forma a verificar se ambos os métodos obtêm resultados semelhantes e se o Método da Capacitância Global pode ser utilizado como método analítico por engenheiros e projetistas na análise térmica de perfis em aço sob a ação do fogo. No Anexo 2 estão presentes todas as curvas de temperatura efetuadas através deste método.

5.3 MÉTODO DE CÁLCULO AVANÇADO

Os métodos de cálculo avançado são vastamente utilizados na Engenharia, principalmente devido à obtenção de resultados fiáveis, mas também de forma a substituir a execução de ensaios experimentais. Em geral, estes métodos de cálculo utilizam modelos numéricos, mais propriamente, o MEF ou o MDF.

As vantagens que estes métodos possuem em relação aos analíticos ou experimentais são diversas, principalmente na realização de análises térmicas de elementos estruturais sob a ação do fogo. Como vantagens tem-se, a possibilidade da execução de análises térmicas de uma estrutura completa e não apenas de elementos isolados, o estudo de estruturas constituídas por diferente número de materiais, com diferentes tipos e dimensões de elementos, sujeitas a diferentes cenários de incêndio [8].

No entanto, os modelos de cálculo avançado são associados a uma elevada complexidade, o que exige ao engenheiro um elevado nível de prática e conhecimento. Com o desenvolvimento computacional ocorrido desde o final do século passado, começaram a surgir os primeiros programas computacionais capazes de realizar facilmente análises térmicas quer em estruturas, quer em elementos isolados em situações de incêndio. Atualmente, existem diversos programas disponíveis no mercado, como, por exemplo, o *ANSYS*®, o *ABAQUS*, o *DIANA*FEA, o *VULCAN*, etc... [69]. De referir ainda o *SAFIR* que foi desenvolvido na Universidade de Liège, na Bélgica, por Jean-Marc Franssen [70]. Em Portugal, é de referenciar o trabalho realizado nesta área por Paulo Vila Real [67-68], por Elza Fonseca [69-71] e por Paulo Piloto [76].

Para desenvolver o cálculo numérico para a análise térmica de perfis em aço sob a ação do fogo, nesta dissertação, recorreu-se ao programa *ANSYS*® *Academic Student R3*. Este programa utiliza o MEF e é indicado quer para a indústria, quer para o ensino. É uma ferramenta de engenharia bastante poderosa, embora seja necessário perceber os conceitos fundamentais sobre o MEF para a sua utilização.

5.3.1 Método de Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos consiste num método numérico bastante utilizado para a análise de uma vasta gama de fenómenos físicos que podem ocorrer em meios contínuos [68,76]. Estes fenómenos são descritos através de equações diferenciais parciais, onde são impostas determinadas condições fronteira e iniciais. Este método é genérico e vastamente utilizado em problemas da Engenharia, quer estruturais, quer térmicos. A principal idealização deste método consiste em dividir um domínio complexo em elementos de geometria simples como triângulos ou quadrados. Esses elementos possuem uma dimensão finita (“elementos finitos”) e estão ligados entre si através de pontos (nós ou pontos nodais). O conjunto de elementos finitos e pontos nodais é designado de malha. A precisão do método depende do número, tamanho e tipo de elemento utilizado na criação da malha. Isto é, apesar de se tratar de um método aproximado, à medida que o tamanho dos elementos utilizados tende para o valor nulo e consequente o número de elementos tende para infinito, a solução converge para a solução exata. Ou seja, quanto mais refinada for a malha, mais precisos serão os resultados obtidos [77].

Outro conceito fundamental no MEF é o conceito de graus de liberdade. Esta idealização de graus de liberdade é originada no movimento de partículas em problemas da Mecânica dos Sólidos. Isto é, os graus de liberdade dos pontos nodais equivalem aos movimentos que este pode sofrer, quer seja de translação, quer de rotação. No entanto, para análises térmicas, apesar de não serem estudados os deslocamentos dos nós, também se utiliza o conceito de grau de liberdade de modo a referenciar a incógnita principal do problema, que neste caso é a temperatura. Os elementos utilizados para este tipo de análise apenas possuem um grau de liberdade, independente da dimensão do problema.

5.3.2 Equação Diferencial de Condução de Calor e Condições Fronteira

A determinação do campo de temperaturas na secção transversal dos perfis em aço é realizada através da solução da equação diferencial de condução de calor apresentada na equação 5.17.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (5.17)$$

Em que λ representa a condutibilidade térmica [W/mK], \dot{Q} o calor gerado internamente no sólido por unidade de volume [J/m²s], ρ a massa volúmica [kg/m³], c_p o calor específico [J/kgK]. As parcelas diferenciais correspondem aos gradientes de temperatura [°C], em função do tempo [s].

A equação diferencial necessita de satisfazer certas condições iniciais e de fronteira [68-69]. As condições iniciais são a distribuição de temperaturas no sólido no instante inicial e as temperaturas ou fluxos prescritos nas superfícies do sólido.

Já as condições de fronteira podem ser:

- **Essenciais (condição de Dirichlet).** As temperaturas são estabelecidas numa parte da fronteira, $\theta = \bar{\theta}$.
- **Naturais.** Corresponde a um fluxo de calor \bar{q} estabelecido em posições Γ_q da fronteira (condição de Newman).

$$q = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = \bar{q} \quad (5.18)$$

Em que n representa o versor normal exterior à fronteira em estudo.

- **Correspondente à transferência de calor por convecção** de uma parte Γ_c da fronteira à temperatura θ para a vizinhança à temperatura θ_∞ (condição de Cauchy).

$$q_c = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = h_c(\theta - \theta_\infty) \quad (5.19)$$

- **Correspondente à transferência de calor por radiação** de uma parte Γ_r da fronteira a uma temperatura θ para e o exterior à temperatura θ_s . Se considerarmos a condição $\theta_s = \theta_\infty$, tem-se que:

$$q_r = \frac{\partial \theta}{\partial n} = h_r(\theta - \theta_\infty) \quad (5.20)$$

- **Correspondente à transmissão de calor simultânea por convecção e por radiação.**

$$q_{cr} = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = h_{cr}(\theta - \theta_\infty) \quad (5.21)$$

5.3.3 Método dos Resíduos Pesados

A maioria dos problemas da Engenharia são governados por equações diferenciais. No entanto, devido às complexidades impostas pela geometria e pelos carregamentos, raramente é possível obter uma solução exata dos problemas. Deste modo, surgem os métodos aproximados, dos quais MEF é, sem dúvida, o mais utilizado. No entanto, o MEF é baseado em outros métodos aproximados como, por exemplo o método dos resíduos pesados.

O método dos resíduos pesados é utilizado para obter soluções aproximadas para equações diferenciais lineares e não lineares utilizando uma formulação integral no domínio do problema. Com uma aproximação por elementos finitos é possível discretizar esta formulação integral para cada elemento [78]. Uma vez agrupados todos os elementos, é possível obter um sistema algébrico do qual resulta a solução aproximada do problema. Sendo $A(u)$ uma equação diferencial da forma:

$$A(u) = Lu + p = 0, \text{ em } \Omega \quad (5.22)$$

Onde L é um operador diferencial e p é independente de u , num domínio Ω sujeito a condições de fronteira em Γ . Com o recurso aos métodos numéricos é possível determinar aproximadamente a função u desconhecida. O domínio do problema Ω é discretizado, sendo associado a cada ponto de discretização uma variável a_j que deve ser calculada. O somatório destas variáveis, em conjunto com as funções de forma N_j definem \hat{u} como uma aproximação da função u desconhecida, no domínio Ω , de acordo com a expressão 5.23.

$$u = \hat{u} = \sum_{j=1}^M N_j a_j \quad (5.23)$$

O conjunto das funções de forma N_m deve ser selecionado de forma a que seja assegurada uma melhoria na aproximação, à medida que o número M de funções de forma utilizadas aumente. Isto é, a condição fundamental para uma melhoria nas aproximações dá-se quando função \hat{u} se aproxima de u à medida que M tende para infinito.

$$R_\Omega = A(\hat{u}) = A\left(\sum_{j=1}^M N_j a_j\right), \text{ em } \Omega \quad (5.24)$$

Ao garantir que a expressão 5.24 seja igual a zero, isto é, que a média pesada deste resíduo seja nula, para qualquer que seja a função de peso W_i utilizada, a função aproximada ajusta-se à função exata. Desta forma, o resíduo é nulo para todo o domínio, tal como é representado na expressão 5.25.

$$\int_{\Omega} W_i R_\Omega d\Omega = 0, i=1, 2, \dots, m \quad (5.25)$$

De acordo com as funções de peso utilizadas, diferentes métodos podem ser utilizados, como o método de Galerkin, o método da Colocação Pontual ou o método da Colocação por Subdomínios [78].

O método selecionado para esta tipologia de problema pode ser o método de Galerkin, onde as funções de peso W_i são as próprias funções de forma N_m utilizadas na determinação da função aproximada \hat{u} . Este método é o mais utilizado, já que confere

vantagem na sua programação computacional, pelo facto de conduzir à apresentação de matrizes simétricas.

De referir também, que é possível estender o método dos resíduos pesados às condições fronteira, considerando um novo resíduo (expressão 5.26), resultando assim na expressão 5.27.

$$R_\Gamma = B(\hat{u}) = B\left(\sum_{j=1}^m N_j a_j\right), \text{ em } \Gamma \quad (5.26)$$

$$\int_{\Omega} W_i R_\Omega d\Omega + \int_{\Gamma} \bar{W}_i R_\Gamma d\Gamma = 0, \quad 1 \leq i \leq m \quad (5.27)$$

Substituindo a expressão 5.24 e 5.25 na equação 5.27 é possível obter a expressão 5.28.

$$\int_{\Omega} W_i A \left(\sum_{j=1}^M N_j a_j \right) d\Omega + \int_{\Gamma} \bar{W}_i B \left(\sum_{j=1}^m N_j a_j \right) d\Gamma = 0, \quad 1 \leq i \leq m \quad (5.28)$$

5.3.4 Método de Elementos Finitos Aplicado à Equação de Condução de Calor

A aplicação do Método de Elementos Finitos na equação de condução de calor consiste na divisão do domínio Ω em subdomínios ou elementos Ω_e e pode ser considerado como uma ampliação do método dos resíduos pesados. Isto é, as funções de forma globais para cada nó são consideradas como o resultado das funções de forma dos elementos que possuem esse nó em comum. Deste modo, pode ser realizada uma aproximação da função u desconhecida, no interior de cada elemento, através da interpolação das variáveis nodais a_j do elemento com as funções de forma, de acordo com a expressão 5.29 [70-71].

$$u^e \approx \hat{u}^e = \sum_{j=1}^m N_j^e a_j^e, \text{ em } \Omega \quad (5.29)$$

Em que m corresponde ao número de nós do elemento.

A expressão integral 5.27 é a soma das contribuições de cada elemento, como demonstra a expressão 5.30.

$$\int_{\Omega} W_i R_\Omega d\Omega + \int_{\Gamma} \bar{W}_i R_\Gamma d\Gamma = \sum_{j=1}^E \int_{\Omega_e} W_i R_{\Omega_e} d\Omega_e + \sum_{j=1}^P \int_{\Gamma_e} \bar{W}_i R_{\Gamma_e} d\Gamma_e = 0 \quad (5.30)$$

Onde E corresponde ao número total de elementos no domínio e P ao número de elementos na fronteira do domínio.

5.3.5 Discretização da Equação de Condução de Calor no Espaço

De forma a realizar a discretização da equação de condução de calor no espaço é necessário que seja substituída por um sistema de equações diferenciais. Assim, é aplicado o método dos resíduos pesados, à equação 5.17 e no domínio Ω , resultando na seguinte expressão [76-78]:

$$\int_{\Omega} W_i R_{\Omega} d\Omega + \int_{\Gamma_q} \bar{W}_i R_q d\Gamma_q + \int_{\Gamma_h} \bar{W}_i R_h d\Gamma_h = 0, \quad i=1,2,\dots \quad (5.31)$$

Em que os resíduos apresentados devem estar de acordo com as seguintes expressões:

$$R_{\Omega} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \dot{Q} - \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad \text{em } \Omega \quad (5.32)$$

$$R_q = \lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} + \bar{q}, \quad \text{em } \Gamma_q \quad (5.33)$$

$$R_h = \lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} + h_{cr} \theta - h_{cr} \theta_{\infty}, \quad \text{em } \Gamma_h \quad (5.34)$$

De notar que a expressão 5.31 não possui o termo relativo ao resíduo R_{θ} . Isto acontece devido ao facto de as temperaturas serem conhecidas nessa fronteira, pelo que esse resíduo considerado nulo.

Substituindo as equações 5.32, 5.33 e 5.34 na expressão 5.31 obtém-se:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} W_i \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \dot{Q} - \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] d\Omega + \\ & + \int_{\Gamma_q} \bar{W}_i \left[\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} + \bar{q} \right] d\Gamma_q + \int_{\Gamma_h} \bar{W}_i \left[\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} + h_{cr} \theta - h_{cr} \theta_{\infty} \right] d\Gamma_h = 0 \end{aligned} \quad (5.35)$$

Realizando uma integração por partes, de acordo com o teorema de Green e considerando as funções de peso arbitrárias ($W_i = -\bar{W}_i$), obtém-se a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} W_i \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right] d\Omega + \int_{\Omega} W_i \dot{Q} d\Omega - \int_{\Omega} W_i \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} d\Omega + \\ & + \int_{\Gamma} W_i \lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} d\Gamma - \int_{\Gamma_q} W_i \bar{q} d\Gamma_q - \int_{\Gamma_h} W_i h_{cr} \theta d\Gamma_h + \int_{\Gamma_h} W_i h_{cr} \theta_{\infty} d\Gamma_h = 0 \end{aligned} \quad (5.36)$$

A solução da equação 5.36 é dada com recurso a uma discretização parcial, formando um sistema de equações diferenciais que seguidamente são integradas em função do tempo. O campo de temperatura, que representa a função desconhecida, é aproximado no interior de cada elemento do domínio recorrendo às temperaturas nodais para

qualquer instante de tempo. O campo de temperaturas pode ser calculado de acordo com a expressão 5.37.

$$\theta = \sum_{j=1}^m N_j(x, y, z) \theta_j(t) = N \theta^e \quad (5.37)$$

Sendo a sua derivada:

$$\dot{\theta} = \frac{\partial \theta}{\partial t} = \sum_{j=1}^m N_j(x, y, z) \dot{\theta}_j(t) = N \dot{\theta}^e \quad (5.38)$$

Tal como já foi referido anteriormente, segundo o método de Galerkin as funções de peso podem ser consideradas as próprias funções de forma, ou seja, $W_i = N_i$. Aplicando esta idealização e substituindo a expressão 5.37 e 5.38 na equação 3.36, obtém-se o seguinte sistema de equações diferenciais:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^m \left[\int_{\Omega^e} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial N_j}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) \right] d\Omega^e + \int_{\Gamma_h^e} h_{cr} N_i N_j d\Gamma_h^e - \int_{\Gamma^e} N_i \lambda \frac{\partial N_j}{\partial n} d\Gamma^e \right] \theta_j + \\ + \sum_{j=1}^m \left[\int_{\Omega^e} N_i \rho c_p \frac{\partial N_j}{\partial t} d\Omega^e \right] \dot{\theta}_j = \int_{\Omega^e} N_i \dot{Q} d\Omega^e - \int_{\Gamma_q^e} N_i \bar{q} d\Gamma_q^e + \int_{\Gamma_h^e} N_i h_{cr} \theta_{\infty} d\Gamma_h^e \end{aligned} \quad (5.39)$$

Recorrendo à expressão anterior, obtém-se o sistema de equações global para o domínio Ω , apresentado pela equação 5.40.

$$K \theta + C \dot{\theta} = F \quad (5.40)$$

Em que:

$$K_{ij} = \sum_{\theta=1}^E \int_{\Omega^e} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial N_j}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) \right] d\Omega^e + \sum_{\theta=1}^n \int_{\Gamma_h^e} h_{cr} N_i N_j d\Gamma_h^e, \quad 1 \leq i, j \leq m \quad (5.41)$$

$$C_{ij} = \sum_{\theta=1}^E \int_{\Omega^e} \rho c_p N_i N_j d\Omega^e, \quad 1 \leq i, j \leq m \quad (5.42)$$

$$F_{ij} = \sum_{\theta=1}^E \int_{\Omega^e} N_i \dot{Q} d\Omega^e - \sum_{\theta=1}^n \int_{\Gamma_q^e} N_i \bar{q} d\Gamma_q^e + \sum_{\theta=1}^p \int_{\Gamma_h^e} N_i h_{cr} \theta_{\infty} d\Gamma_h^e, \quad 1 \leq i, j \leq m \quad (5.43)$$

Onde n é o número de elementos que possuem fronteira do tipo Γ_h e p é o número de elementos que possuem fronteira do tipo Γ_q .

Para domínios bidimensionais, estudados nesta dissertação, as operações na direção z devem ser consideradas igual a zero, tendo:

$$K_{ij} = \sum_{\theta=1}^E \int_{\Omega^e} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial N_j}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) \right] d\Omega^e + \sum_{\theta=1}^n \int_{\Gamma_h^e} h_{cr} N_i N_j d\Gamma_h^e, \quad 1 \leq i, j \leq m \quad (5.44)$$

$$C_{ij} = \sum_{\theta=1}^E \int_{\Omega^e} \rho c_p N_i N_j d\Omega^e, \quad 1 \leq i, j \leq m \quad (5.45)$$

$$F_{ij} = \sum_{\theta=1}^E \int_{\Omega^e} N_i \dot{Q} d\Omega^e - \sum_{\theta=1}^n \int_{\Gamma_q^e} N_i \bar{q} d\Gamma_q^e + \sum_{\theta=1}^p \int_{\Gamma_h^e} N_i h_{cr} \theta_{\infty} d\Gamma_h^e, \quad 1 \leq i, j \leq m \quad (5.46)$$

O campo de temperaturas aproximando para estes domínios bidimensionais, é dado pelas seguintes expressões:

$$\theta = \sum_{j=1}^m N_j(x, y) \theta_j(t) = N \theta^e \quad (5.47)$$

$$\dot{\theta} = \frac{\partial \theta}{\partial t} = \sum_{j=1}^m N_j(x, y) \dot{\theta}_j(t) = N \dot{\theta}^e \quad (5.48)$$

5.3.6 Discretização da Equação de Condução de Calor no Tempo

Para solucionar o sistema de equações diferenciais apresentado na expressão 5.40 é necessário realizar a sua discretização no tempo. Para esse efeito, é possível recorrer à utilização de métodos numéricos, mais concretamente o MEF ou o MDF [71-72].

Seguindo uma discretização do tempo segundo o MDF, considera-se que o sistema de equações é apenas satisfeito em pontos discretos (t_{n+a}) de cada intervalo de tempo (t_n, t_{n+1}) e que, uma vez que o sistema apenas envolve derivadas de primeira ordem, pressupõe-se que a temperatura varia linearmente ao longo de intervalos de tempo Δt .

Desta forma, as temperaturas no instante $t_{n+a} = t_n + a\Delta t$ são calculadas de acordo com a seguinte expressão:

$$\theta_{n+a} = \theta_n + \frac{a\Delta t(\theta_{n+1} - \theta_n)}{\Delta t}, \quad 0 < a \leq 1 \quad n \in (0, 1, \dots, N-1) \quad (5.49)$$

Onde a corresponde ao parâmetro que define o instante de tempo em que o sistema de equações 5.40 é satisfeito, dentro de cada intervalo de tempo.

Substituindo a equação 5.49 e a sua derivada na equação 5.40, obtém-se a fórmula de recorrência apresentada pela expressão 5.50.

$$\hat{K}_{n+a} \theta_{n+a} = \hat{F}_{n+a}, \quad 0 < a \leq 1 \quad n \in (0, 1, \dots, N-1) \quad (5.50)$$

Em que:

$$\hat{K}_{n+a} = K_{n+a} + \frac{C_{n+a}}{a\Delta t} \quad (5.51)$$

$$\hat{F}_{n+a} = F_{n+a} + \frac{C_{n+a}}{a\Delta t} \theta_n \quad (5.52)$$

Assim, conclui-se que o campo de temperaturas no final do intervalo de tempo obtém-se segundo a equação 5.53.

$$\theta_{n+a} = \frac{\theta_{n+a}}{a} + \left(1 - \frac{1}{a}\right) \theta_n \quad (5.53)$$

O parâmetro a presente na expressão anterior varia resultando em diferentes esquemas de integração no tempo. De acordo com a regra de Garlekin o operador assume o valor de $a = 2/3$. Já segundo a regra de Crank-Nicolson este assume o valor $a = 1/2$. Outra possibilidade é a utilização da regra de Backward Euler que assume o valor deste parâmetro igual à unidade. A eficiência dos diferentes esquemas de integração apresentados no tempo é discutível, pois cada esquema possui as suas próprias características de convergência, precisão e estabilidade [73].

5.3.7 Processo Iterativo para Problemas de Transferência de Calor Não Lineares

Quando os materiais em estudo possuem propriedades térmicas não lineares, isto é, que variam em função da temperatura, como é o caso do aço, o sistema de equações expresso pela equação 5.40 toma a seguinte formulação [73]:

$$K_{(\theta,t)} \theta(t) + C_{(\theta,t)} \dot{\theta}(t) = F_{(\theta,t)} \quad (5.54)$$

Com vista a satisfazer as condições de não linearidade das propriedades térmicas do material, é necessária a implementação de um processo iterativo para obter a convergência do método. Deste modo, é possível recorrer ao método de Newton-Raphson modificado que consiste num sistema de forças residuais apresentado na expressão seguinte:

$$\Psi_{n+a}^i = \hat{F}_{n+a}^i + \hat{K}_{n+a}^i \theta_{n+a}^{i+1} \neq 0 \quad (5.55)$$

Desta forma, a solução corrigida em cada iteração é calculada pelas seguintes expressões:

$$\Delta \theta_{n+a}^i = [\hat{K}_{n+a}^i]^{-1} \Psi_{n+a}^i \quad (5.56)$$

$$\theta_{n+a}^i = \theta_{n+a}^{i-1} + \Delta \theta_{n+a}^i \quad (5.57)$$

O sistema de equações 5.56 deve ser resolvido para cada $\Delta\theta_{n+a}^i$ para cada interação, até a convergência ser atingida, sendo a matriz $[\hat{K}_{n+a}^i]$ atualizada a cada interação. O cálculo do critério apresentado na expressão 5.58 verifica a convergência.

$$\frac{\|\Delta\theta_{n+a}^i\|}{\|\theta_{n+a}^{i+1}\|} < TOL \quad (5.58)$$

Em que TOL é a tolerância exigida, $\|\ \|$ corresponde à norma euclidiana, $\Delta\theta_{n+a}^i$ corresponde à alteração do campo de temperaturas e θ_{n+a}^{i+1} representa o valor da temperatura atual correspondente.

5.3.8 Modelo Numérico no ANSYS®

Nesta dissertação, tal como já foi referido, as análises térmicas das diferentes gamas de perfis em aço não protegidos foram realizadas com o auxílio de modelos numéricos realizados no programa de elementos finitos ANSYS® *Academic Student R3*.

O ANSYS® *Academic Student R3* possui diferentes tipologias de elementos finitos, que devem ser selecionados de acordo com o tipo de análise a realizar, a geometria do sólido em estudo, as propriedades do material e estado transiente ou estacionário do problema físico. Estes elementos diferenciam-se principalmente pelo seu formato e número de nós.

Para a realização da análise térmica de todos os perfis em aço estudados foi selecionado o elemento finito *PLANE77* de oito nós. Este elemento é utilizado em simulações bidimensionais, possui um grau de liberdade de temperatura em cada nó e é aplicável em análises em regime transiente. Os resultados obtidos com este tipo de elemento podem ser as temperaturas nodais, os gradientes térmicos ou as componentes do fluxo de calor [80]. Na Figura 5.5 está representado o elemento *PLANE77* com a sua respetiva geometria e nós.

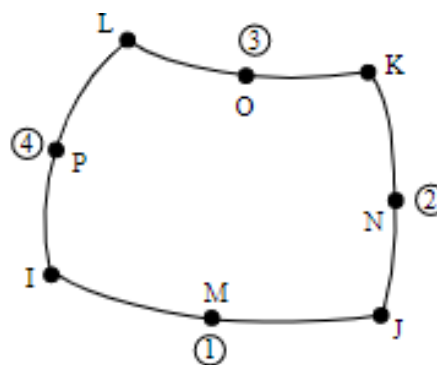


Figura 5.5 - Elemento Plane77 de 8 nós [81]

Para cada nó representado pelas letras I, L, K, N, M, J, O e P na figura, existe uma função de forma N_i associada. Estas funções de forma são definidas conforme as coordenadas do nó relativamente ao elemento associado. A variação das coordenadas ξ ($-1 \leq \xi \leq 1$) e η ($-1 \leq \eta \leq 1$), altera a função de forma do respetivo nó. Os nós, deste elemento, podem ser considerados isoparamétricos, isto é, a geometria e campo de temperaturas são interpolados com as mesmas funções e especificados de forma paramétrica. As funções de forma para cada nó são apresentadas na Tabela 5.6 [82].

Tabela 5.6 - Funções de Forma de cada nó do elemento PLANE77

Nó	Função de Forma
I, J, K, L	$N_i = \frac{1}{4}(1 + \xi_0)(1 + \eta_0) - \frac{1}{4}(1 - \xi^2)(1 + \eta_0) - \frac{1}{4}(1 + \xi_0)(1 - \eta^2)$
O	$N_i = \frac{1}{2}(1 - \xi^2)(1 + \eta_0)$
M	$N_i = \frac{1}{2}(1 - \xi^2)(1 - \eta_0)$
N	$N_i = \frac{1}{2}(1 + \xi_0)(1 - \eta^2)$
P	$N_i = \frac{1}{2}(1 - \xi_0)(1 - \eta^2)$

Nas expressões da Tabela 5.6, ξ_i e η_i são valores de coordenadas locais enquanto, ξ e η são valores das coordenadas nos nós.

O aço foi considerado como um material não linear e isotrópico. Os perfis em aço analisados (IPE, HEM, L e UAP) foram expostos às três curvas de incêndio nominais (ISO 834, Hidrocarbonetos e Elementos Exteriores) nos quatro lados.

Na elaboração da malha de elementos finitos foi utilizada uma dimensão para a aresta do elemento igual 2 mm, sendo esta gerada automaticamente pelo programa. A dimensão da aresta do elemento foi escolhida tendo em consideração a necessidade de existir pelo menos 2 elementos de malha na menor espessura do perfil. Na Figura 5.6 pode ser observada a malha dos perfis com menor secção transversal de cada gama.

A modelação das diferentes geometrias dos perfis em estudo foi auxiliada por uma folha de cálculo em *Excel*. A folha de cálculo, após introduzidos as principais dimensões do perfil, calcula diretamente as coordenadas dos pontos a introduzir no *ANSYS® Academic Student R3* para a modelação da geometria do perfil.

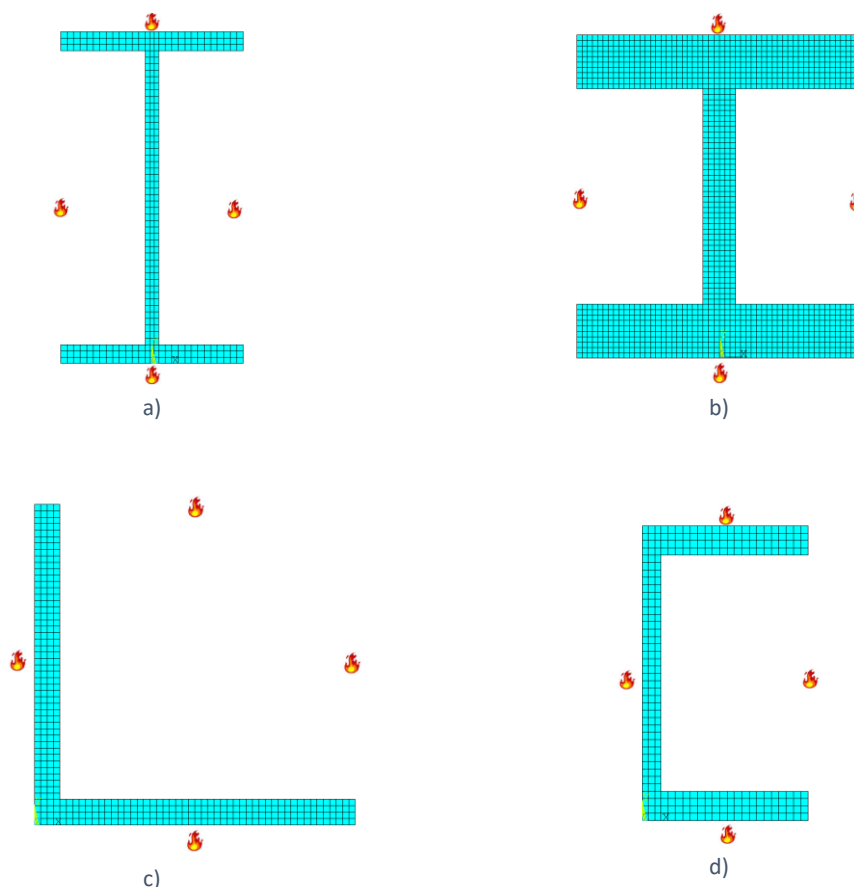


Figura 5.6 - Exemplo de malha aplicada aos perfis em aço. a) IPE 100, b) HEM 100, c) L 100x100x8 e d) UAP 80

Devido à exposição ao fogo, as condições de fronteira utilizadas neste modelo prendem-se com o fluxo de calor por radiação e convecção introduzidas na fronteira exterior do modelo. A ação do fogo é aplicada no exterior do perfil. O coeficiente de convecção de acordo com a curva de incêndio utilizada (Tabela 5.5) e uma emissividade do fogo igual à unidade e o aço considerou-se igual a 0,7. A condição inicial corresponde à temperatura inicial do modelo sendo considerada a temperatura ambiente de 20°C.

A análise numérica será não linear e transiente com um tempo de exposição ao fogo de 60 minutos. Para resolver as equações numéricas que constituem este problema, o programa recorre ao método iterativo de Newton-Raphson modificado. O controlo do tempo é definido para um intervalo de tempo de 5 segundos, em que o incremento mínimo é de 0,1 segundos e o máximo de 5 segundos. Foi utilizado um critério de convergência baseado na temperatura com uma tolerância admitida de 0,1. A sua verificação foi realizada pela norma euclidiana L2 proposta pelo próprio programa. Esta norma verifica a convergência recorrendo à soma da raiz quadrada dos quadrados do desequilíbrio de força para todos os graus de liberdade [80].

Com o objetivo de diminuir o tempo gasto com o pré processamento do modelo, foi utilizado um código para gerar tabelas com os valores de tempo e temperatura das

curvas de incêndio nominais em linguagem APDL (*ANSYS® Parametric Design Language*). O código do algoritmo deve ser escrito em arquivos com extensão “*.txt”, sendo este posteriormente copiado e colado diretamente na barra de comandos do *ANSYS® Academic Student R3*. No Anexo 4 é possível observar os códigos das curvas de incêndio.

Para o modelo numérico, o perfil de temperaturas nodais foi estudado em três nós diferentes. Desta forma, é possível verificar com mais precisão o quão aproximados são os métodos analíticos do numérico e em que zona do perfil. Na Figura 5.7 são apresentados os nós em que a distribuição da temperatura vai ser estudada. Como todos os perfis possuem um ou mais eixos de simetria, o estudo dos três nós selecionados conseguem descrever o aquecimento do perfil.

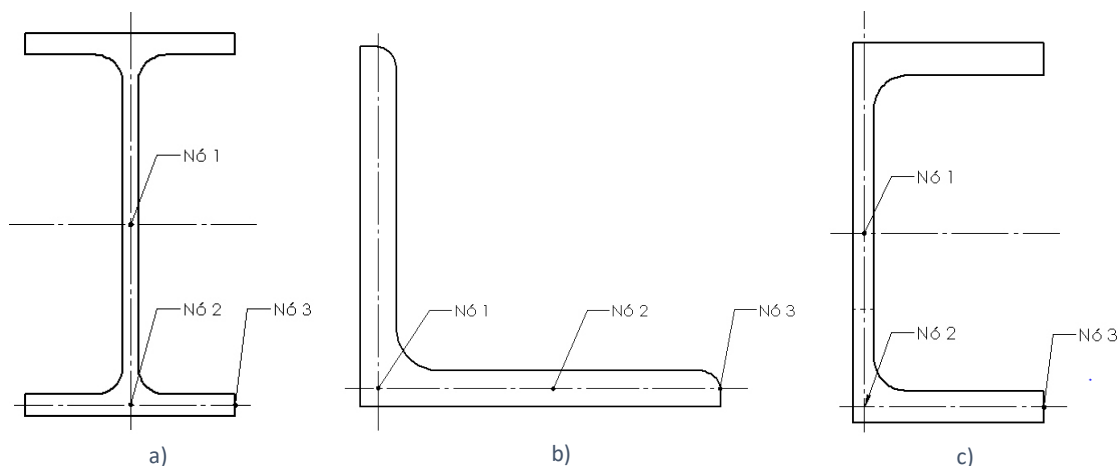


Figura 5.7 - Pontos nodais estudados para cada perfil. a) IPE/HEM, b) L e c) UAP

Os resultados obtidos por este método serão comparados e discutidos com os obtidos pelo analítico posteriormente, bem como expostos no Anexo 2.

PERFIS EM AÇO PROTEGIDOS

6.1 MODELO NÚMERICO NO ANSYS®

6.2 VAZIOS INTERNOS

6 PERFIS EM AÇO PROTEGIDOS

A elevada condutibilidade térmica do aço permite que este atinja temperaturas elevadíssimas num curto espaço de tempo. Por conseguinte, a maioria das estruturas construídas apenas em aço não cumprem os requisitos mínimos de resistência ao fogo impostos pelas normas e legislação. Por isso, é recorrente o uso de um material de proteção capaz de retardar o aquecimento do elemento estrutural, aumentando assim a resistência térmica da estrutura.

Atualmente, o gesso é um dos materiais utilizados na proteção de elementos estruturais em aço, principalmente sob forma de placas por serem de fácil instalação e esteticamente agradáveis.

A determinação da distribuição de temperaturas na secção transversal de perfis em aço protegidos pode ser executada quer por métodos experimentais, numéricos ou analíticos, tal como para os perfis em aço não protegidos

Neste capítulo é abordada a modelação numérica realizada no programa computacional *ANSYS® Academic Student R3* e a influência da modelação de vazios.

6.1 MODELO NUMÉRICO NO ANSYS®

A proteção passiva de estruturas metálicas custa entre 15% e 30% do custo total da estrutura, o que coloca um entrave à competitividade da construção metálica [19]. Deste modo, é necessário definir com máximo rigor o material, a espessura e o esquema de proteção a utilizar de forma a não inviabilizar o projeto economicamente.

O dimensionamento da espessura de proteção pode ser executado analiticamente ou consultando valores tabelados fornecidos pelos fabricantes de proteção. De acordo com P. Vila Real [5], é possível calcular a espessura de proteção ideal para qualquer perfil através de um processo iterativo a partir do conhecimento prévio do tempo de resistência ao fogo e do fator de massividade do perfil. Nesta dissertação foi arbitrado o valor de 20 mm de espessura para todos os perfis estudados, uma vez que o principal objetivo é estudar a influência da proteção passiva na distribuição de temperaturas da secção transversal do perfil.

Por outro lado, é possível ainda averiguar se uma espessura de proteção de 20 mm é o suficiente para que qualquer dos perfis estudados não ultrapasse a temperatura crítica, que pode ser calculada através de equações prescritas no Eurocódigo 3 – Parte 1-2 [34]. No entanto, optou-se por considerar as temperaturas críticas *standard* preconizadas pela versão belga e francesa do Eurocódigo 3 – Parte 1-2 provisório [83]. Estas devem ser escolhidas em função do tipo de solicitação imposta ao elemento estrutural, de acordo com a Tabela 6.1

Tabela 6.1 - Temperaturas críticas para elementos estruturais em aço sujeitos à ação do fogo [83]

		Temperatura Crítica [°C]
Elementos estruturais à tração ou compressão		540
Vigas em que a encurvadura lateral não é um potencial modo de falha	Isostática	540
	Hiperstática	570
Colunas e vigas sujeitas a encurvadura lateral e ligações viga-coluna		500

De notar que estes valores são empíricos não sendo baseados em nenhum método analítico. Estes são bastante convenientes ao projetista, mas, no entanto, são conservadores e podem não garantir a fiabilidade económica do projeto [57]. Foi selecionado o valor de temperatura crítica de 500°C para os perfis estudados, de forma que a estejam sujeitos ao valor mais conservador.

O esquema ou disposição do material de proteção é geralmente realizado de duas formas:

- **Proteção disposta ao longo do contorno do perfil**, geralmente utilizada para argamassas ou tintas intumescentes (Figura 6.1 a);
- **Proteção disposta em caixão**, utilizada para placas rígidas como placas de gesso (Figura 6.1 b).



Figura 6.1 – Diferentes disposições de proteção de perfis metálicos [34]: a) Ao longo do contorno do perfil e b) Em caixão

Optou-se por utilizar a disposição em caixão devido ao facto de o material utilizado para a proteção dos perfis serem placas de gesso. A proteção em caixão possui a

particularidade de formar vazios ou cavidades de ar entre o perfil e a proteção. Assim, será possível estudar, posteriormente, a influência do ar nas cavidades.

Dado que o objetivo principal é a determinação do campo de temperaturas na secção transversal do perfil, a análise térmica dos perfis protegidos foi realizada num plano bidimensional. Para a modelação numérica no programa *ANSYS® Academic Student R3*, o elemento finito selecionado foi o *PLANE77* de oito nós, pelas razões já evidenciadas no capítulo anterior. O tamanho da aresta de cada elemento é de 2 mm sendo a malha gerada automaticamente pelo programa.

Os perfis serão os mesmos, já estudados pelos métodos mencionados anteriormente (IPE, HEM, L e UAP) sujeitos às três curvas nominais de incêndio (ISO 834, Elementos Exteriores e Hidrocarbonetos) e expostos nos 4 lados (Figura 6.2 e Figura 6.4). O aço, o gesso e o ar foram considerados materiais com propriedades não lineares e isotrópicos. Assumiu-se contacto perfeito entre todos os materiais, de forma a permitir a condução térmica entre os elementos.

Devido ao facto dos perfis IPE e HEM possuírem simetria geométrica e de carregamento, foi apenas modelado $\frac{1}{4}$ de cada perfil protegido. Já os perfis UAP possuem apenas um eixo de simetria sendo analisado $\frac{1}{2}$ de cada perfil. Os perfis L possuem um eixo de simetria na diagonal pelo que se optou por não se realizar simplificações para não criar imperfeições na malha. Desta forma foi possível diminuir o tempo de cálculo e esforço computacional, uma vez que os modelos já possuem complexidade por serem constituídos por materiais diferentes e possuem uma malha com elevado número de elementos. As simplificações são apresentadas na Figura 6.2 e Figura 6.4.

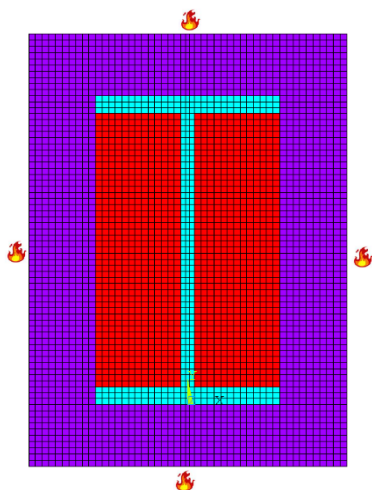


Figura 6.2 - Frentes de fogo no perfil IPE 100 protegido com malha de elementos

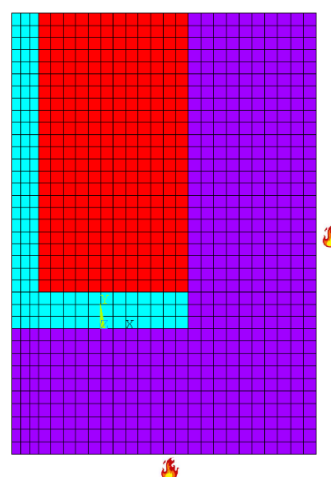


Figura 6.3 - Simplificação de 1/4 do perfil IPE 100 protegidos

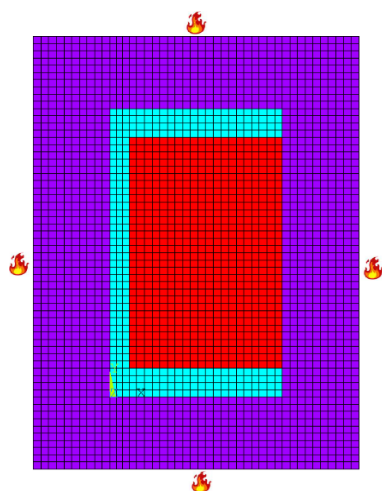


Figura 6.4 - Frontes de fogo no perfil UAP 80 protegido com malhas de elementos

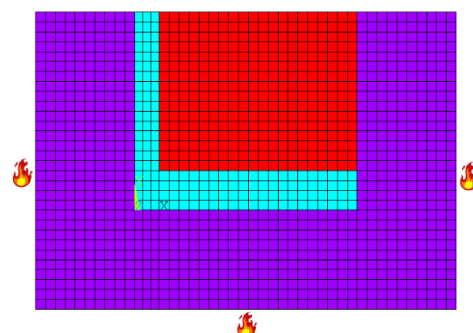


Figura 6.5 - Simplificação do perfil UAP 80



Nestes modelos, as condições de fronteira impostas, devido à exposição ao fogo, relacionam-se com a convecção e radiação, tal como nos perfis em aço não protegidos. O coeficiente de convecção utilizado seguiu os valores preconizados pelo Eurocódigo 3 – Parte 1-2 [34], para cada curva de incêndio nominal, apresentados na Tabela 5.5. A condição inicial foi considerada a de 20°C. A emissividades do gesso foi considerada 0,9 [84].

O tempo de exposição ao fogo dos perfis foi de uma hora. O intervalo de tempo definido foi de 5 segundos, com um incremento mínimo de 0,1 e máximo de 5 segundos. O critério de convergência utilizado é baseado na temperatura, sendo admitida uma tolerância de 0,1. A verificação da convergência foi realizada por uma norma proposta pelo programa.

Os pontos nodais onde foi estudado o campo de temperaturas nos perfis foram os mesmos do capítulo anterior, apresentados na Figura 5.7. Os resultados serão discutidos no capítulo seguinte. No Anexo 2 são apresentadas todas as curvas de temperaturas e imagens do campo de temperaturas para os perfis protegidos estudados.

6.2 VAZIOS INTERNOS

Na construção metálica é necessário recorrer à utilização de elementos estruturais que contêm vazios ou cavidades internas ocupadas por ar, como por exemplo elementos tubulares ou secções de perfis isolados em caixão com placas rígidas, tal como demonstrado na Figura 6.6.

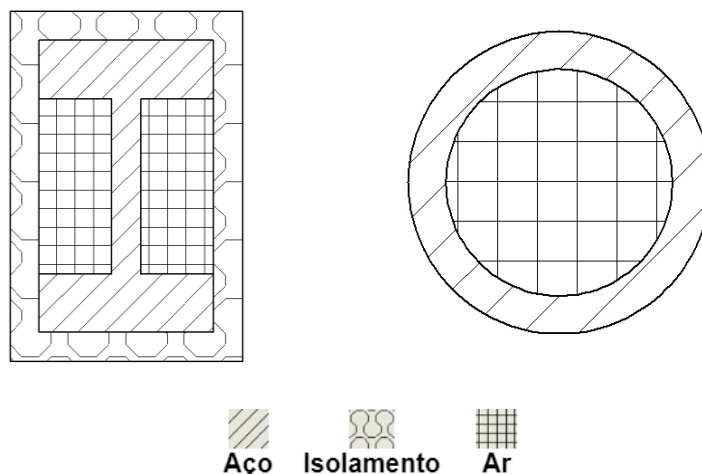


Figura 6.6 - Exemplos de elementos estruturais que contêm vazios internos

Dado o facto de a disposição das placas de gesso nos perfis protegidos formarem vazios internos (proteção em caixão), estudaram-se os efeitos da modelação do ar nos vazios. Para a obtenção dos resultados foram simuladas duas situações distintas. Na primeira modelação não se considerou ar nos vazios, enquanto na segunda se modelou o ar nos vazios assumindo um contacto perfeito entre todos os materiais existindo apenas trocas de calor por condução conforme demonstra a Figura 6.7 e Figura 6.8, respetivamente.

Desta forma, considerou-se a secção transversal de um perfil em aço IPE 100 protegido em caixão com placas de gesso do tipo F com 20 mm de espessura no programa.

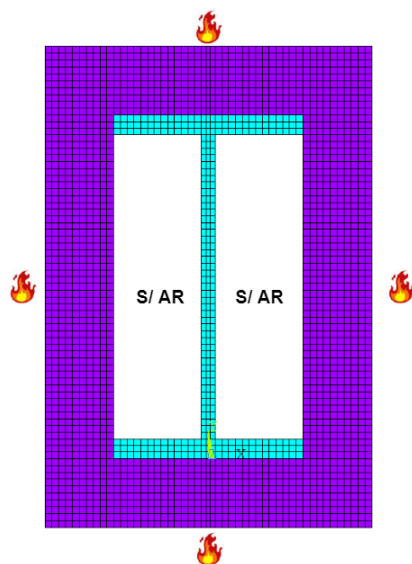


Figura 6.7 - IPE 100 s/ modelação de ar nas cavidades

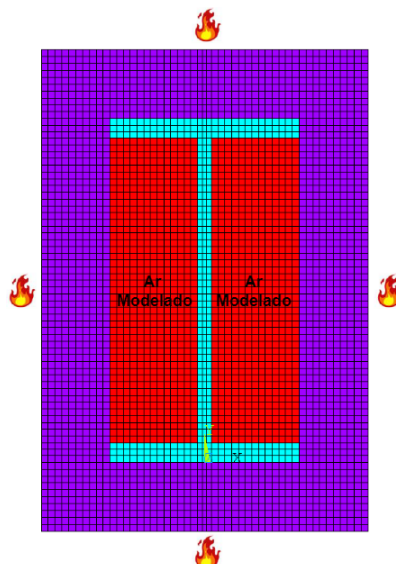


Figura 6.8 - IPE 100 c/ ar modelado nas cavidades

Os resultados de temperatura [°C] são apresentados após 60 minutos de exposição ao fogo segundo a curva de incêndio nominal ISO 834, conforme é apresentado na Figura 6.9.

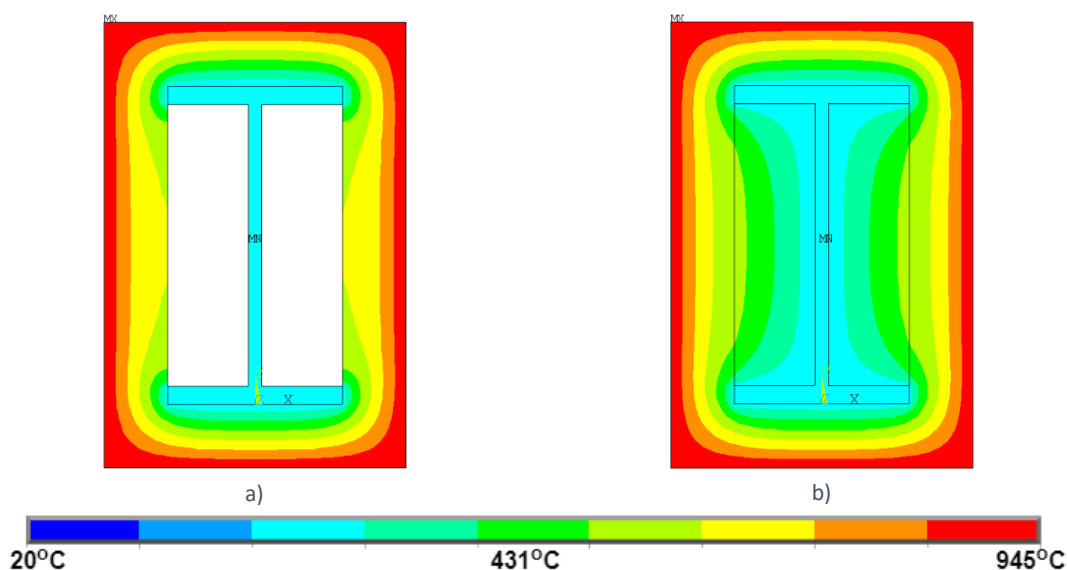


Figura 6.9 - Resultados numéricos de temperatura [°C] para uma exposição ao fogo de 60 minutos. a) IPE 100 sem malha de ar nas cavidades e b) IPE 100 com malha de ar nas cavidades

Na Figura 6.10 é apresentado a evolução da temperatura nodal no centro da alma do perfil em função de tempo.

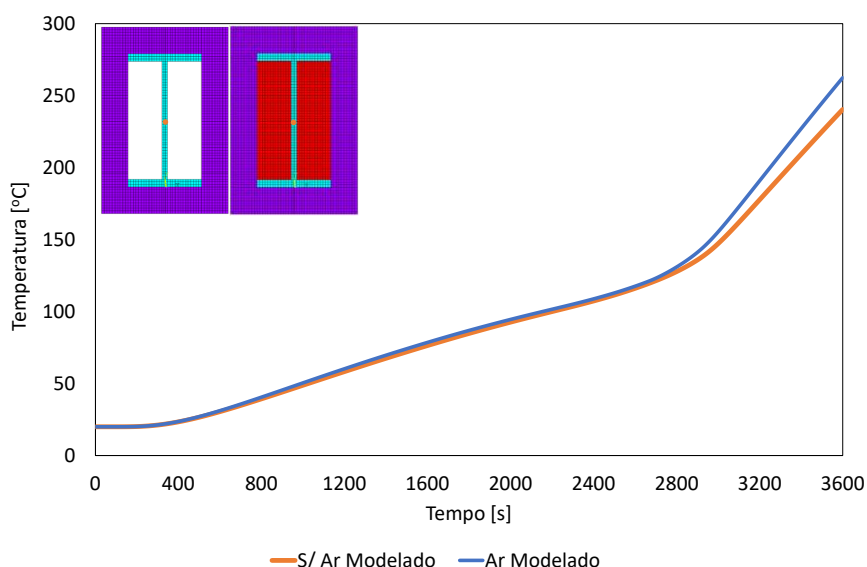


Figura 6.10 - Temperatura em função do tempo para o perfil IPE 100 sem ar e com ar modelado nas cavidades

Analisando os resultados obtidos nas Figura 6.9 e Figura 6.10, é possível concluir que, quando se utiliza uma malha de elementos finitos de ar nas cavidades formadas pela proteção passiva, as temperaturas nodais no centro da alma do perfil são significativamente superiores, principalmente após 2800 segundos de exposição ao fogo. A razão é que ao não modelar a área das cavidades, o programa assume como uma situação adiabática, ou seja, não existem trocas de calor. Deste modo, considerar a presença de ar nas cavidades com trocas de calor por condução conduz a resultados mais aproximados da realidade em comparação com os modelos adiabáticos.

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

7.1 PERFIS EM AÇO NÃO PROTEGIDOS

7.2 PERFIS EM AÇO PROTEGIDOS

7 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

O cálculo da distribuição de temperaturas na secção transversal de perfis em aço pode ser realizado por diferentes métodos. O método preconizado pelo Eurocódigo 3 - Parte 1-2 [34], é um método analítico que considera uma distribuição uniforme de temperaturas na secção transversal do perfil. Ainda existem outros métodos analíticos como o método da capacitância global. Contudo, as simulações numéricas demonstram que a distribuição de temperaturas não é uniforme.

Para realizar a análise térmica dos perfis em aço não protegidos (IPE, HEM, L e UAP), utilizaram-se dois métodos analíticos: o Método Simplificado preconizado pelo Eurocódigo 3 e o Método da Capacitância Global, de forma a comparar os resultados obtidos. Ainda é discutido a influência da utilização das propriedades térmicas lineares do aço propostas pelo Eurocódigo 3 - Parte 1-2 [34].

Para determinar a distribuição de temperaturas não uniforme na secção transversal utilizaram-se simulações numéricas, onde foram escolhidos três pontos com o objetivo de traçar o perfil de temperaturas em função do tempo de aquecimento. Mais uma vez, a comparação centrou-se nas diferenças demonstradas entre a utilização de diferentes métodos.

Por último, são realizadas simulações numéricas aos mesmos perfis em aço protegidos em caixão com placas de gesso, sendo comparadas com os perfis não protegidos.

7.1 PERFIS EM AÇO NÃO PROTEGIDOS

7.1.1 Métodos Analíticos

Nos perfis em aço não protegidos, um dos resultados analisados foi a concordância entre os dois métodos analíticos estudados, o Método Simplificado proposto pelo Eurocódigo 3 e o Método da Capacitância Global. Para a comparação foram selecionados 6 perfis distintos de cada gama. O principal objetivo passou por averiguar se o Método da Capacitância Global produz resultados semelhantes ao preconizado pelo Eurocódigo 3 - Parte 1-2 [34], e se este pode ser usado como alternativa em projetos de construção metálica. Seguidamente, pretendeu-se estudar qual a influência do fator de massividade do perfil no desenvolvimento de temperaturas quando este é exposto ao fogo em 4

lados. Por último, tentou-se perceber qual a influência da utilização das propriedades térmicas não lineares do aço na análise térmica de perfis expostos ao fogo.

Na Figura 7.1, Figura 7.2 e Figura 7.3 é possível analisar o campo de temperaturas para os perfis IPE de acordo com os dois métodos num tempo de exposição de 1800 s. Os perfis de temperatura segundo o método do Eurocódigo 3 são apresentados a traço contínuo com a referência [perfil]_EC 3. Para o Método da Capacitância Global são apresentados a traço interrompido com a designação [perfil]_CG.

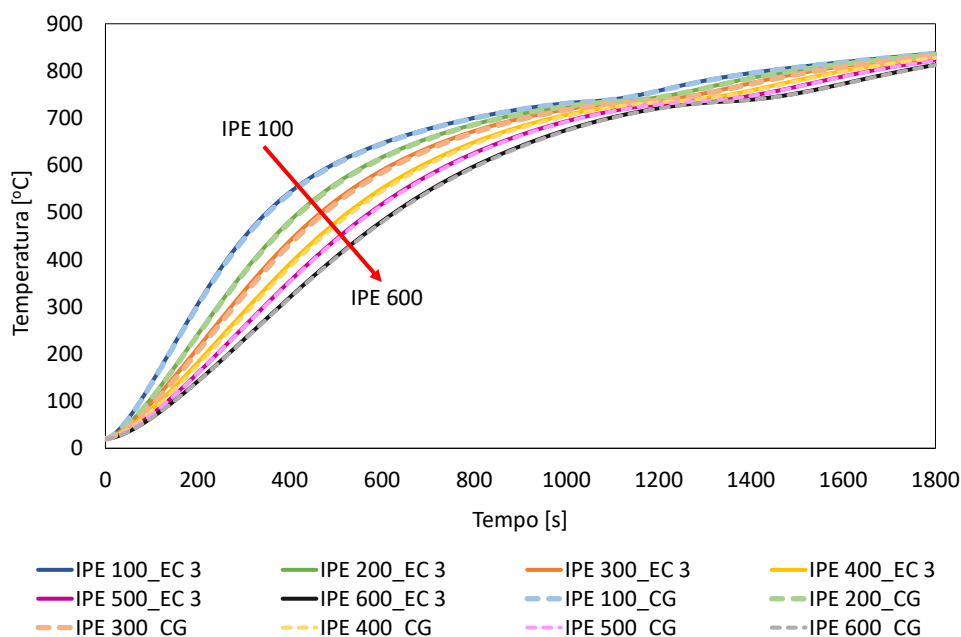


Figura 7.1 – Temperatura dos perfis IPE expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

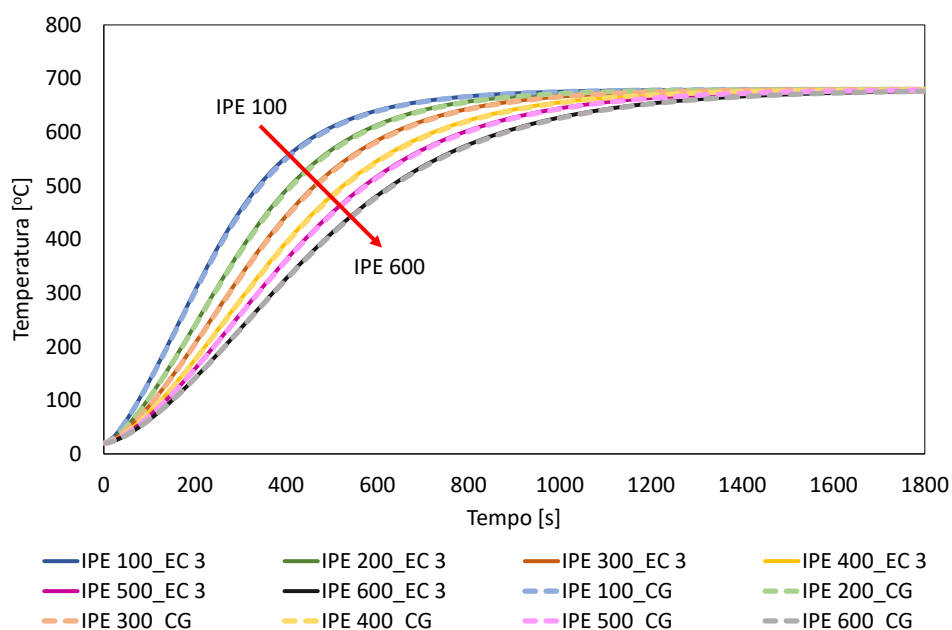


Figura 7.2 – Temperatura dos perfis IPE expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

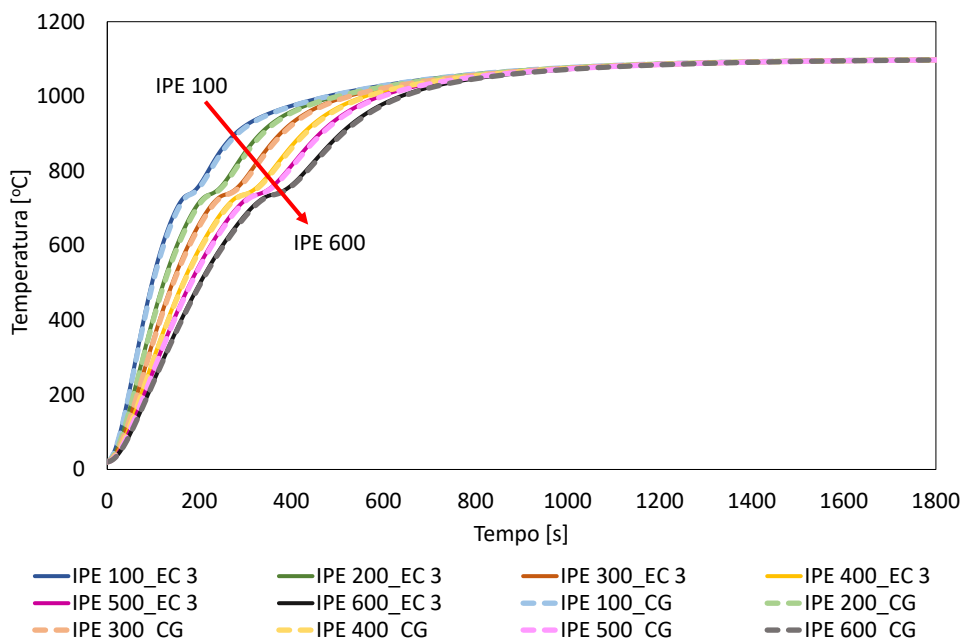


Figura 7.3 - Temperatura dos perfis IPE expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

Analisando os gráficos, é possível afirmar que as análises térmicas através do Método da Capacitância Global são próximas das realizadas pelo método do Eurocódigo 3, uma vez que os valores das temperaturas são muito próximos para qualquer tamanho de perfil e qualquer curva nominal de incêndio. O erro máximo obtido é 2%, conforme demonstra a Figura 7.4, concluindo assim que o método é válido e pode ser usado como alternativa ao proposto pelo Eurocódigo 3 durante o projeto de estruturas metálicas para esta tipologia de perfil.

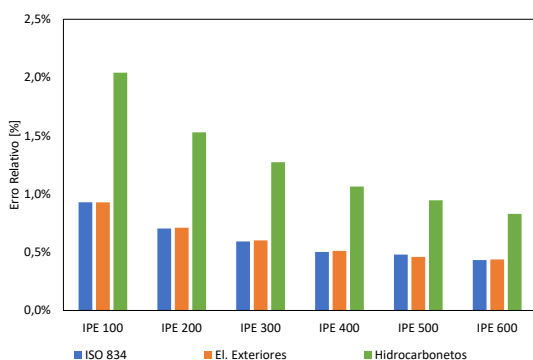


Figura 7.4 - Erro Relativo dos resultados obtidos através do Método de Capacitância Global em relação ao Método do EC3

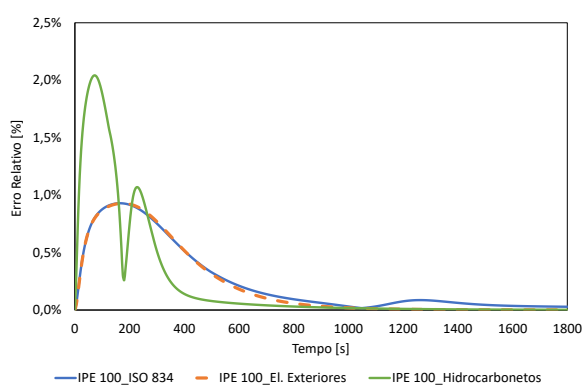


Figura 7.5 – Erro relativo para o perfil IPE 100 em função do tempo de aquecimento

A análise das figuras acima demonstra que o erro diminui com o aumento da secção transversal do perfil. De notar ainda que o erro máximo obtido nas curvas de incêndio ISO 834 e de Elementos exteriores é semelhante, devido à semelhança das curvas de aquecimento nos instantes iniciais. Em todos os perfis, o maior erro é obtido na curva de incêndio de Hidrocarbonetos, devido à severidade da mesma e ao elevado aumento

de temperatura nos instantes iniciais, tal como indica a Figura 7.5 que apresenta o erro relativo para o perfil IPE 100 em função do tempo de aquecimento.

Foi estudada a influência do tamanho dos perfis IPE na análise para as três curvas de incêndio nominais. Conforme é demonstrado na Figura 7.1, Figura 7.2 e Figura 7.3, com o aumento do tamanho do perfil os valores do campo de temperaturas diminui para esta tipologia de perfis nas três curvas de incêndio. Este facto está diretamente relacionado com o fator de massividade. À medida que a secção transversal do perfil aumenta, o fator de massividade diminui, o que faz com que o campo de temperaturas seja mais baixo e o perfil aqueça mais lentamente.

Também foi estudada a influência do fator de massividade para as restantes tipologias de perfis. Foi efetuada a comparação da evolução da temperatura entre os dois métodos analíticos.

Para os perfis HEM, foi possível observar que o Método da Capacitância Global possui uma ótima concordância com o Método do Eurocódigo 3 para todas as curvas de incêndio nominais, uma vez que se sobrepõem, tal como demonstram os perfis de temperaturas apresentados na Figura 7.6, Figura 7.8 e Figura 7.9.

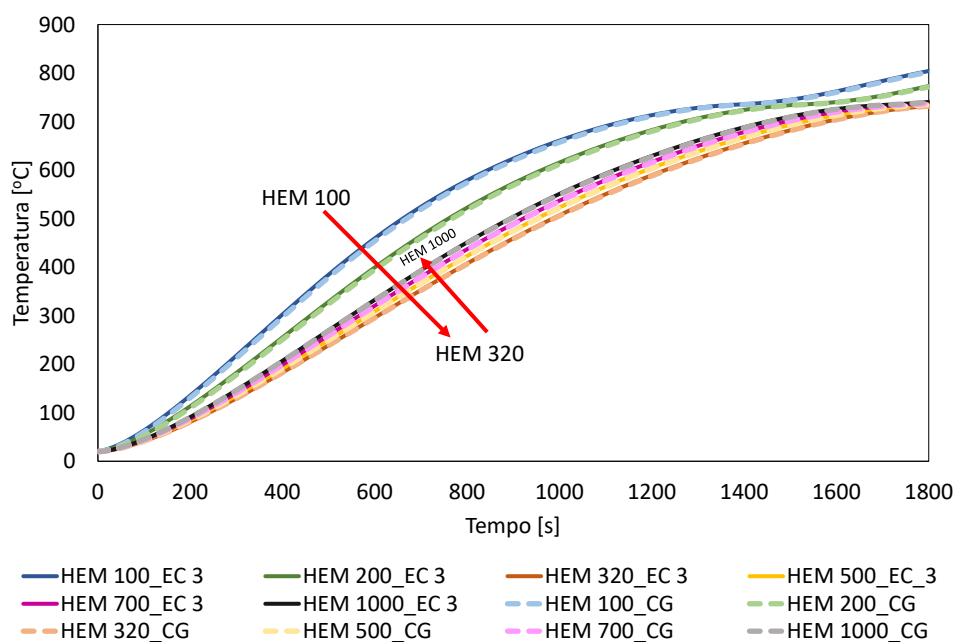


Figura 7.6 - Temperatura dos perfis HEM expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

Ao contrário do que acontece com os perfis IPE, para os HEM não é verificada linearidade no que diz respeito ao aumento da secção transversal e diminuição do perfil de temperaturas. Isto é, apesar do aumento da secção transversal, o valor das temperaturas desenvolvidas diminui do HEM 100 até ao HEM 320 e de seguida volta a aumentar até ao HEM 1000. Esta não linearidade é devido ao facto de a partir do perfil HEM 320 possuir um fator de massividade maior que o HEM 1000. Apesar da área da

secção transversal aumentar, o perímetro aumenta de forma mais acentuada, o que implica um aumento do fator de massividade dos perfis a partir do perfil HEM 320, como observado na Figura 7.7.

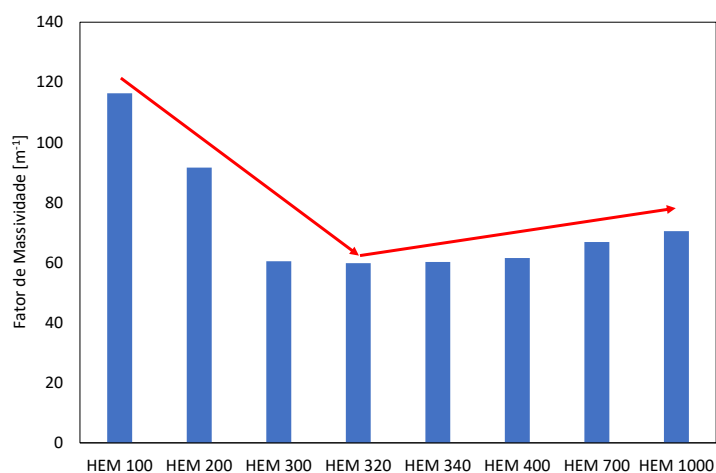


Figura 7.7 - Fator de massividade dos perfis HEM

O mesmo fenómeno pode ser observado para os perfis quando expostos às restantes curvas de incêndio nominais, bem como a existência de concordância entre os dois métodos, conforme é demonstrado na Figura 7.8 e Figura 7.9.

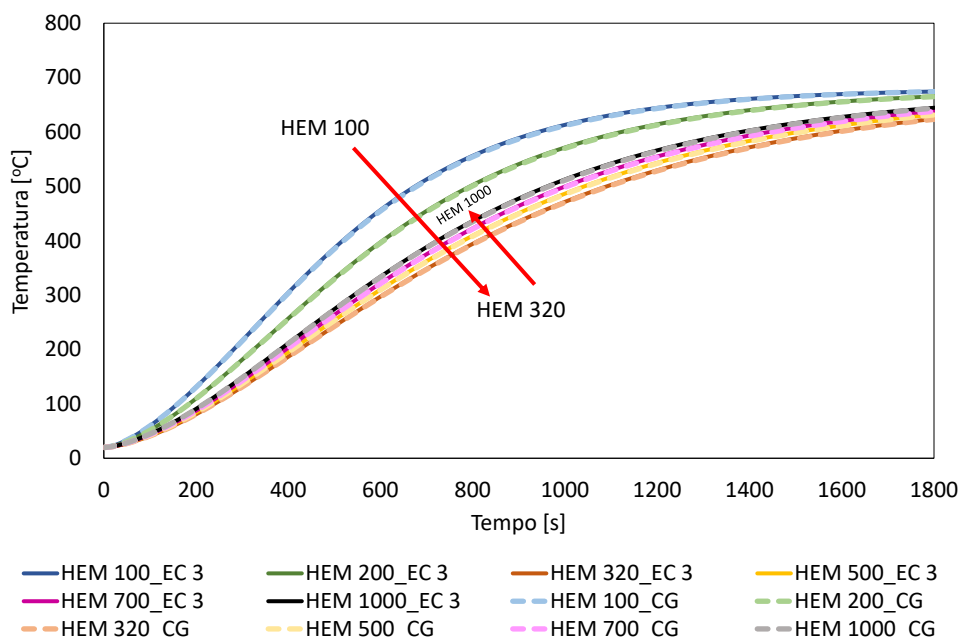


Figura 7.8 - Temperatura dos perfis HEM expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

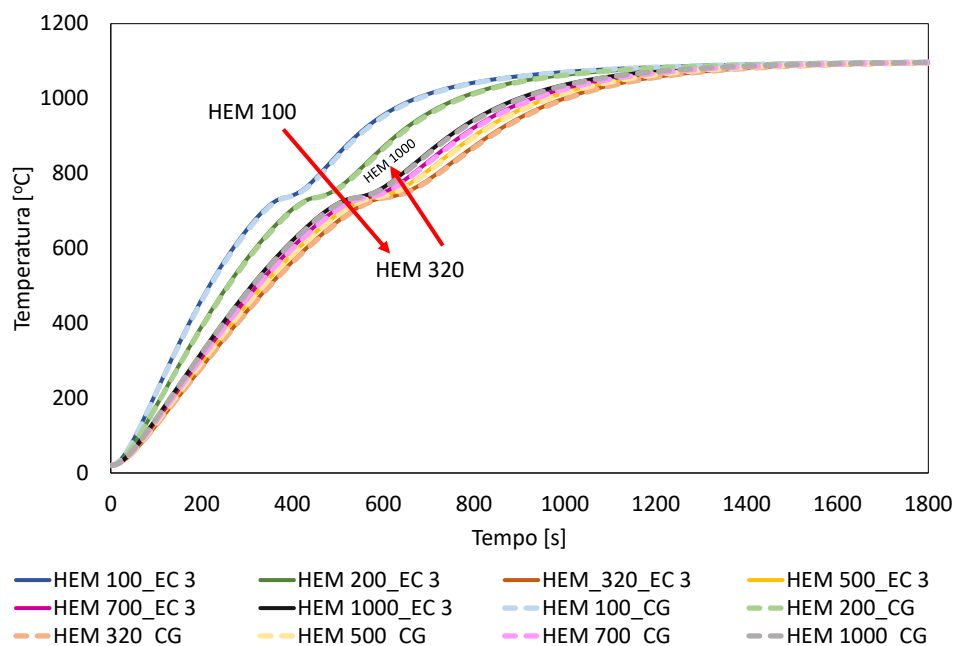


Figura 7.9 - Temperatura dos perfis HEM expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

Por último, os resultados das análises térmicas realizadas aos perfis L (Figura 7.10, Figura 7.11 e Figura 7.12) e UAP (Figura 7.13, Figura 7.14 e Figura 7.15), utilizando as duas metodologias analíticas, foram conformes para as três curvas de incêndio nominais, tal como para as gamas de perfis já referenciadas. À semelhança do que acontece com os perfis IPE, com o aumento da secção transversal o campo de temperaturas diminui, devido ao facto de os fatores de massividade diminuírem.

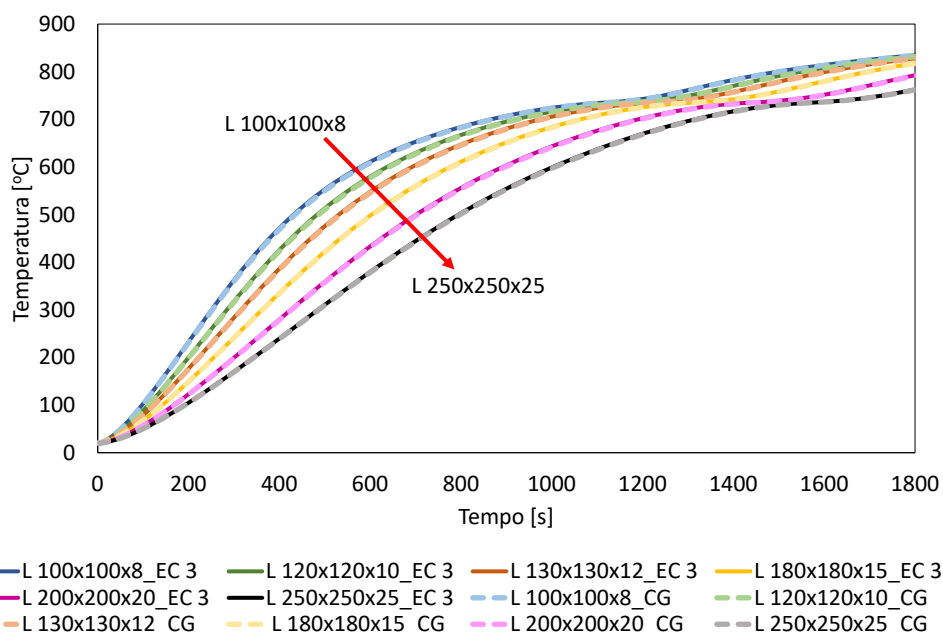


Figura 7.10 - Temperatura dos perfis L expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

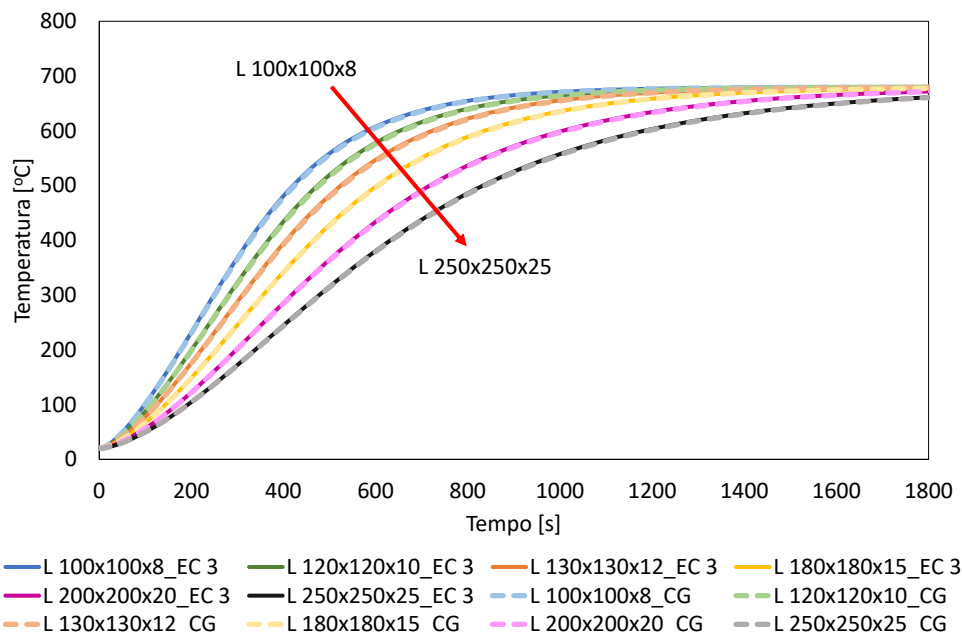


Figura 7.11 - Temperatura dos perfis L expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

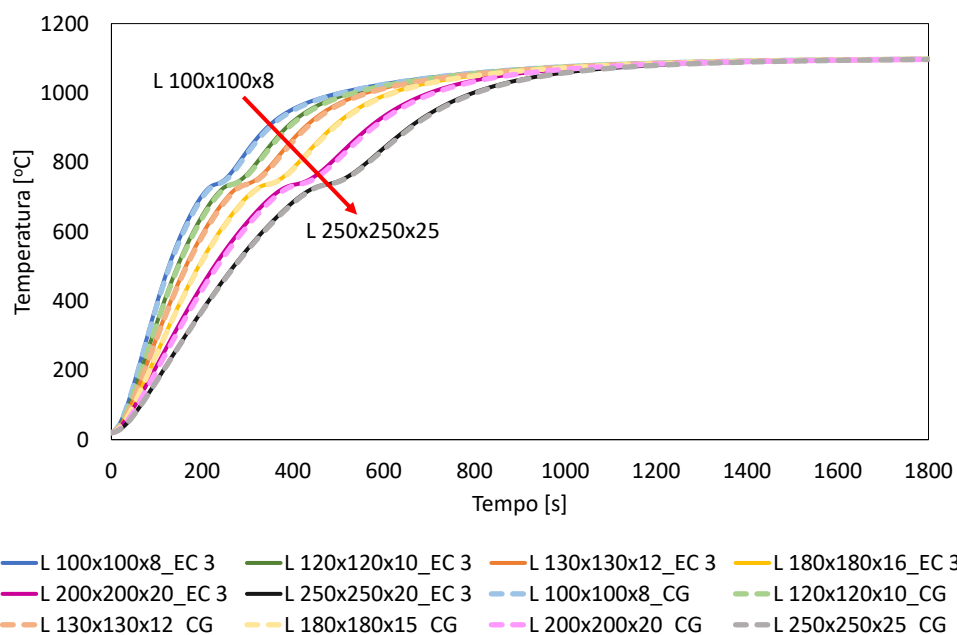


Figura 7.12 - Temperatura dos perfis L expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

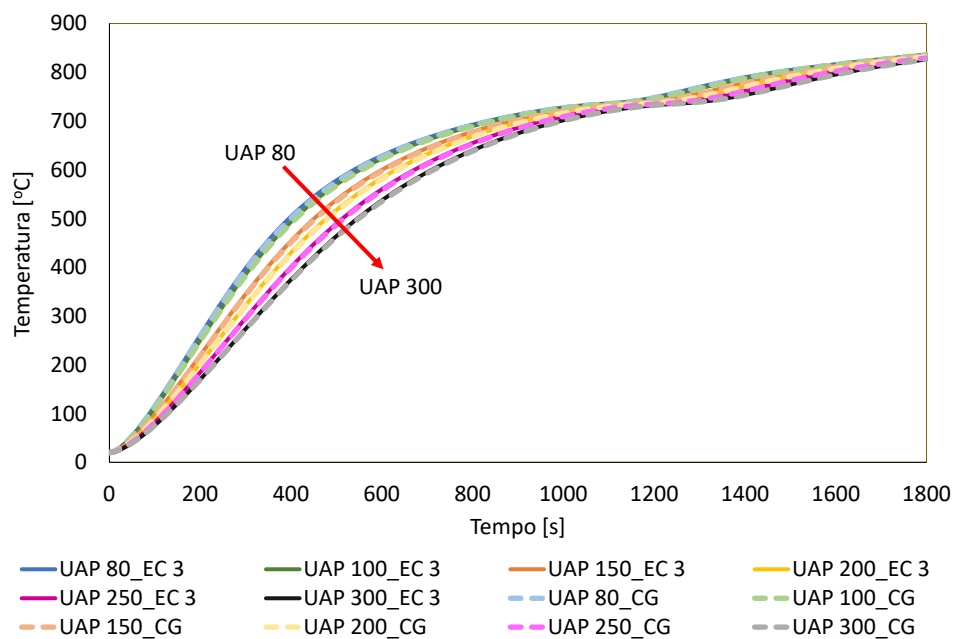


Figura 7.13 - Temperatura dos perfis UAP expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

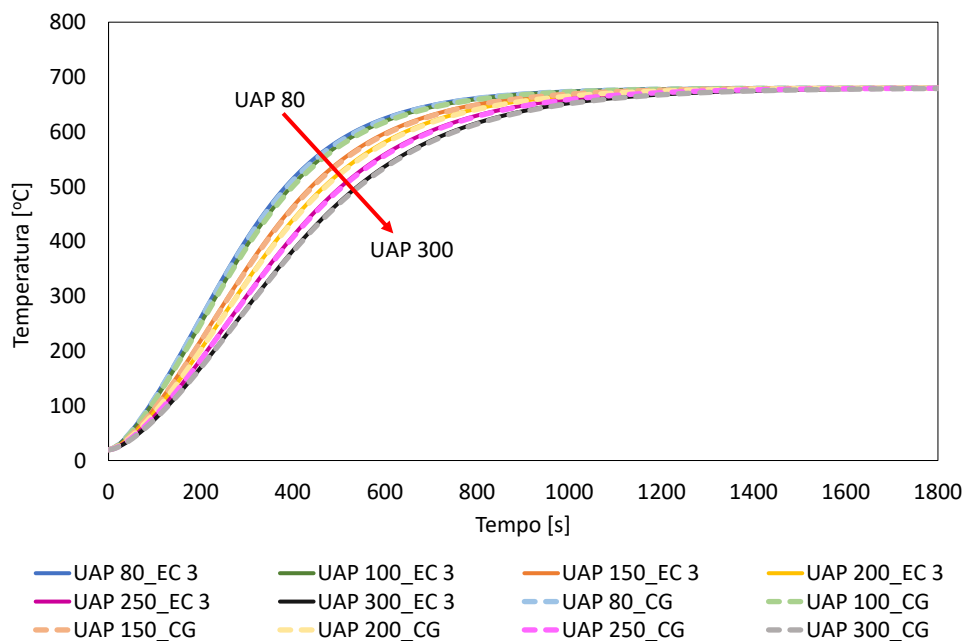


Figura 7.14 - Temperatura dos perfis UAP expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

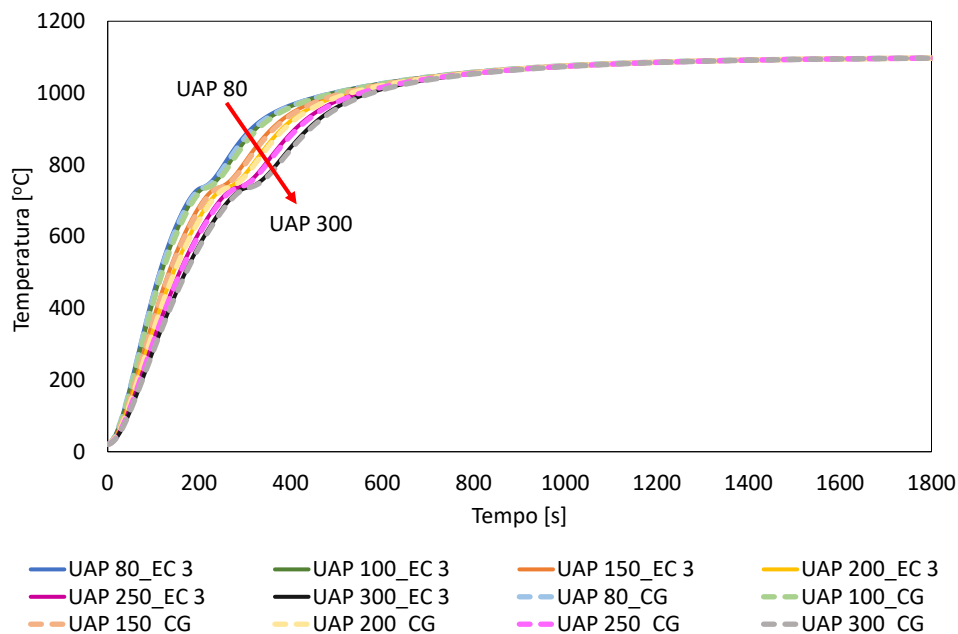


Figura 7.15 - Temperatura dos perfis UAP expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos. Comparação entre o Método da Capacitância Global e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

Outra análise prendeu-se com estudo comparativo entre a utilização das propriedades térmicas não lineares e das propriedades constantes do aço evidenciadas no Eurocódigo 3, Parte 1-2 nos métodos analíticos. Para isso, foram realizadas análises térmicas de dois perfis IPE (IPE 100 e IPE 600), expostos à curva de incêndio nominal ISO 834 nos 4 lados, pelo Método preconizado pelo Eurocódigo 3. A Figura 7.16 apresenta a evolução da temperatura, para cada perfil, em função do tempo utilizando as propriedades não lineares e constantes do aço propostos pelo Eurocódigo 3.

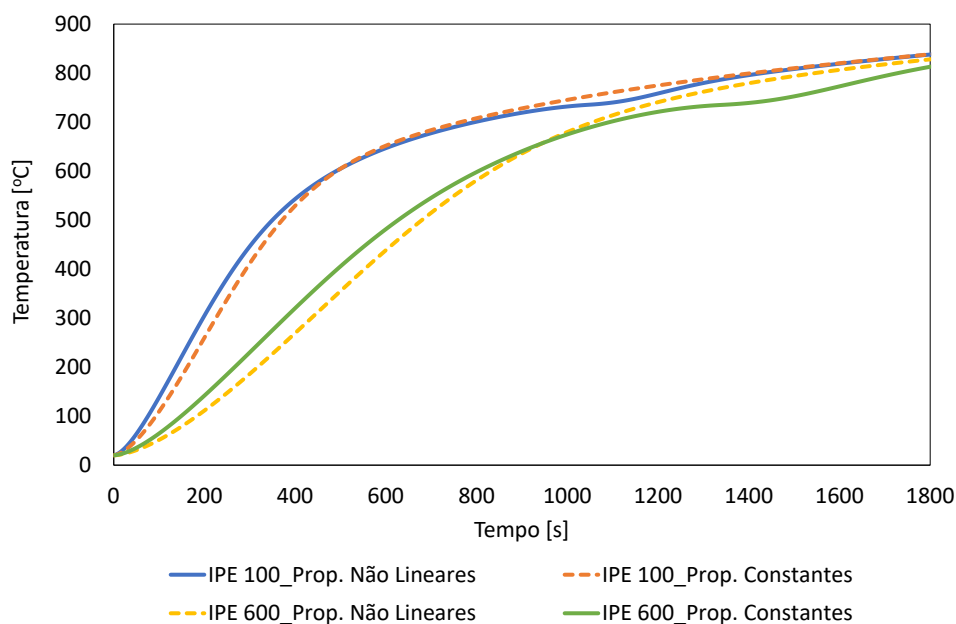


Figura 7.16 - Temperatura dos perfis IPE 100 e IPE 600 expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre a utilização das propriedades térmicas não lineares e das propriedades constantes

A Figura 7.16 demonstra que a utilização das propriedades lineares do aço na análise térmica de perfis em aço origina a obtenção de valores de temperatura mais baixos nos primeiros instantes de exposição ao fogo, quando o aquecimento do perfil se dá de forma mais rápida. A partir do instante em que as temperaturas do perfil começaram a aproximar-se da temperatura do fogo, a utilização das propriedades lineares do aço provoca temperaturas mais elevadas do que quando se utilizam propriedades não lineares. Ainda é possível concluir que, quanto maior a secção transversal do perfil, maior é diferença dos resultados obtidos com as propriedades térmicas. Por fim, é de notar que a utilização das propriedades lineares não causa a diminuição de temperaturas quando o perfil atinge entre os 700°C e os 800°C. Isto acontece devido ao facto de as propriedades térmicas lineares não considerarem o pico do calor específico do aço.

7.1.2 Método de Cálculo Avançado

Nos métodos de cálculo avançado, um dos resultados obtidos foi a evolução da temperatura em diferentes pontos nodais, que será comparada com a evolução da temperatura calculada através dos métodos analíticos, mais concretamente com o Método preconizado pelo Eurocódigo 3. Para este efeito foram escolhidos três pontos nodais para cada perfil, com o intuito de perceber a evolução da temperatura nos diferentes constituintes (alma e banzo) e qual o ponto que atinge temperaturas mais elevadas. O principal objetivo passa por verificar se a evolução da temperatura através do método numérico possui valores semelhantes aos obtidos pelo analítico do Eurocódigo 3 e se é possível considerar uma distribuição constante para qualquer perfil. Pretendeu-se ainda perceber qual o ponto que atinge maior temperatura para cada perfil. Por último, foi averiguada a relação do aumento da secção transversal do perfil com a diferença de temperaturas existente na mesma.

Para dar resposta aos objetivos descritos, procedeu-se à análise da evolução de temperatura de três perfis de cada gama estudada expostos ao fogo segundo as três curvas de incêndio nominal.

Inicialmente, foram analisados os perfis IPE (100, 300 e 600) expostos à curva incêndio ISO 834, de Elementos Exteriores e de Hidrocarbonetos, conforme é apresentado na Figura 7.17, Figura 7.18 e Figura 7.19, respetivamente. Ao comparar as diferentes análises, verificou-se que as curvas de evolução da temperatura para o perfil IPE 100 através do método numérico nos diferentes pontos nodais convergiam em todo o intervalo de tempo para qualquer curva de incêndio analisada. No entanto, à medida que a secção transversal do perfil aumenta, a variação da distribuição de temperaturas ao longo da secção transversal também aumenta. Por exemplo, para uma exposição ao fogo segundo a curva de incêndio ISO 834, aos 900 segundos, a variação de temperatura máxima para o IPE 100 é de 2°C. Já para o perfil IPE 600 é 79°C.

No entanto, é possível verificar que quando se atinge uma hora de exposição ao fogo, os gradientes térmicos na secção transversal são pouco significativos, para qualquer perfil IPE exposto a qualquer curva de incêndio. Desta forma, pode-se afirmar que, para esse instante de tempo, existe uma distribuição de temperaturas constante na secção transversal do perfil.

De notar ainda que o perfil IPE 600 sujeito a uma exposição ao fogo de acordo com a curva de Hidrocarbonetos, para um tempo de 500 segundos, apresenta uma variação de temperatura de 211°C. No entanto, o mesmo perfil exposto à curva de incêndio ISO 834, para o mesmo tempo, apresenta de 122°C. Sendo assim, é possível afirmar que, quanto maior a severidade da curva de incêndio, maior é a variação da distribuição de temperaturas na secção transversal do perfil.

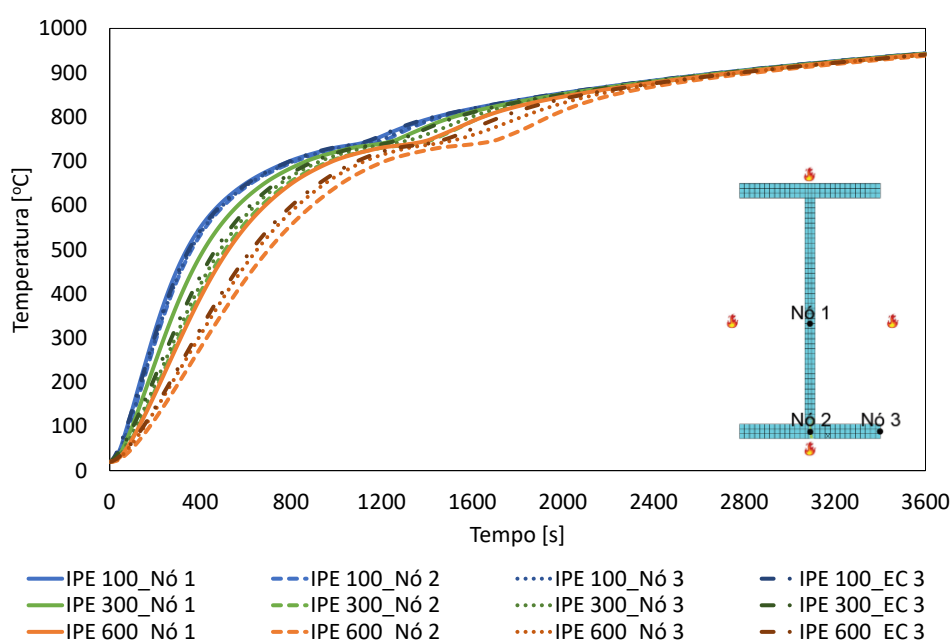


Figura 7.17 - Temperatura dos perfis IPE expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

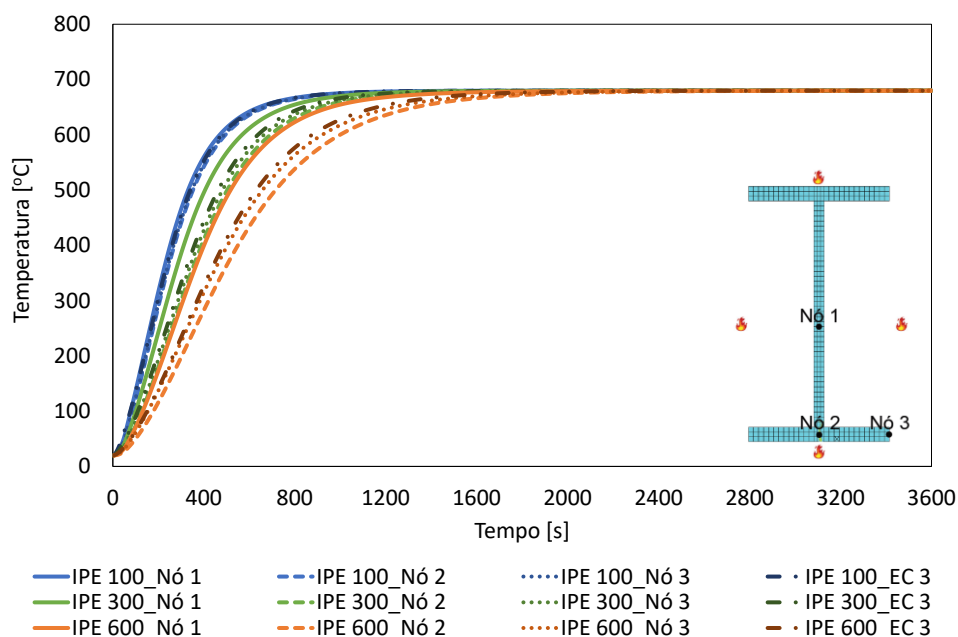


Figura 7.18 - Temperatura dos perfis IPE expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

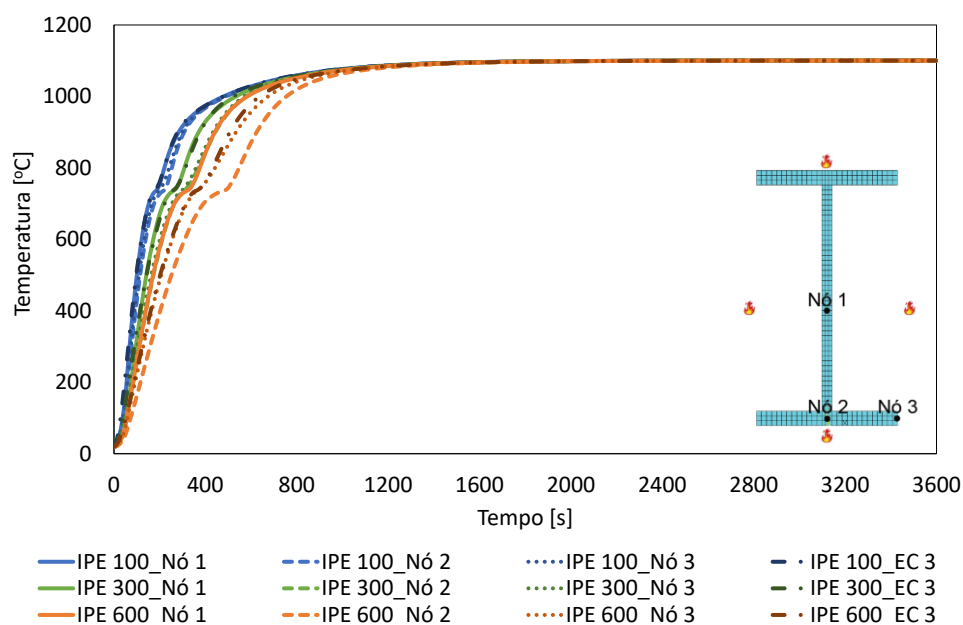


Figura 7.19 - Temperatura dos perfis IPE expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

Outra análise prendeu-se com a comparação entre os resultados obtidos entre o método numérico e o analítico preconizado pelo Eurocódigo 3. Para o perfil IPE 100, verificou-se que as curvas de evolução de temperatura para os diferentes pontos nodais eram idênticas, devido aos baixos gradientes térmicos na secção transversal do perfil. No entanto, os gradientes térmicos elevados dos perfis IPE 300 e 600 causam discrepâncias acentuadas entre as curvas de evolução de temperatura obtidas através do método numérico e o simplificado do Eurocódigo 3. Verificou-se, que a média

aritmética dos valores de temperatura nos três pontos nodais estudados aproxima-se aos valores calculados pelo método do Eurocódigo 3, conforme demonstrado na Figura 7.20, perfil IPE 600.

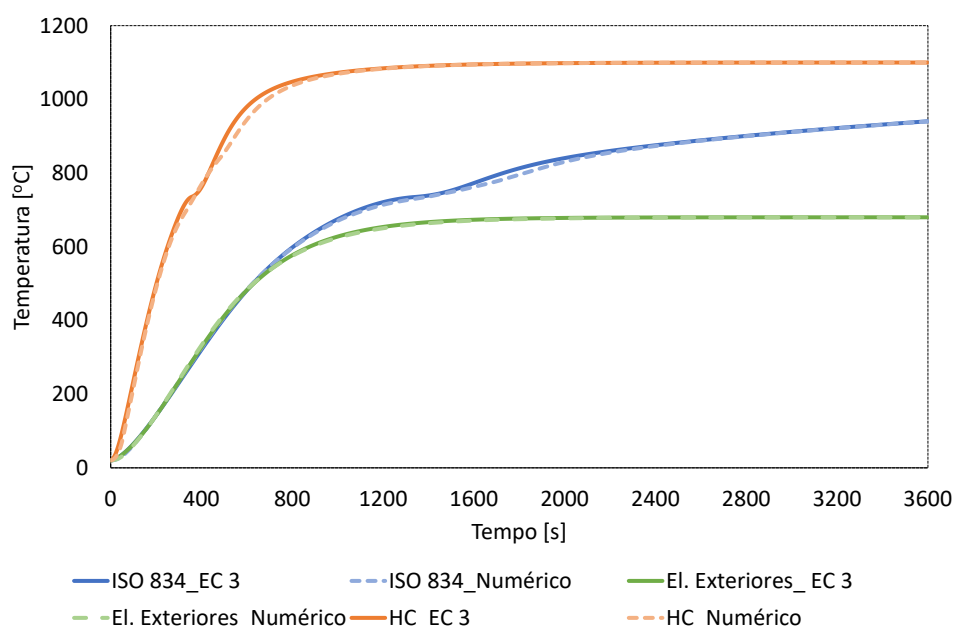


Figura 7.20 – Comparação da evolução de temperaturas entre a média dos três pontos nodais e o método do Eurocódigo 3

Por último, a análise prendeu-se com o estudo da secção reta do perfil que atinge a maior temperatura. Foi constatado que, derivado à pequena espessura e elevado comprimento da alma, a secção que atinge as temperaturas mais elevada é a zona central da alma (Nó 1). Já a zona que atinge menores temperaturas é a região central do banzo (Nó 2), uma vez que possui um rácio espessura/comprimento mais elevado.

Para avaliar a influência do fator da massividade na obtenção de gradientes térmicos na secção transversal dos perfis analisaram-se as curvas das temperaturas dos perfis HEM. Esta gama de perfis possui a particularidade de o perfil com maior secção transversal (HEM 1000) não possuir o menor fator de massividade. Foram então analisadas as curvas de temperaturas para o perfil HEM 100, que possui a menor secção transversal e maior fator de massividade, para o HEM 320, que possui o menor fator de massividade, e para o HEM 1000, que possui a secção transversal maior, para a curva de incêndio ISO 834 (Figura 7.21), de Elementos Exteriores (Figura 7.22) e de Hidrocarbonetos (Figura 7.23).

Comparando as curvas da evolução da temperatura nos diferentes pontos nodais dos perfis estudados, verificou-se que o perfil HEM 100 possui uma distribuição praticamente uniforme para todo o intervalo de tempo ao longo da secção transversal em qualquer curva de incêndio. Já os perfis HEM 320 e 1000 possuem variações acentuadas de temperatura na secção transversal, principalmente entre a alma e banzo.

O HEM 320, apesar de apresentar o fator de massividade menor desta gama de perfis, regista gradientes de temperatura menores do que o HEM 1000. Por exemplo, para uma exposição ao fogo segundo a curva ISO 834, instante de tempo 900 segundos, o perfil HEM 320 apresenta uma variação de temperatura máxima de 114°C. Já o HEM 1000 regista um valor de 186°C, para o mesmo tempo. Desta forma, é possível afirmar que a diminuição do fator de massividade não influencia o aumento dos gradientes térmicos, embora se verifique que o aumento da secção transversal do perfil, aumenta os gradientes térmicos na mesma.

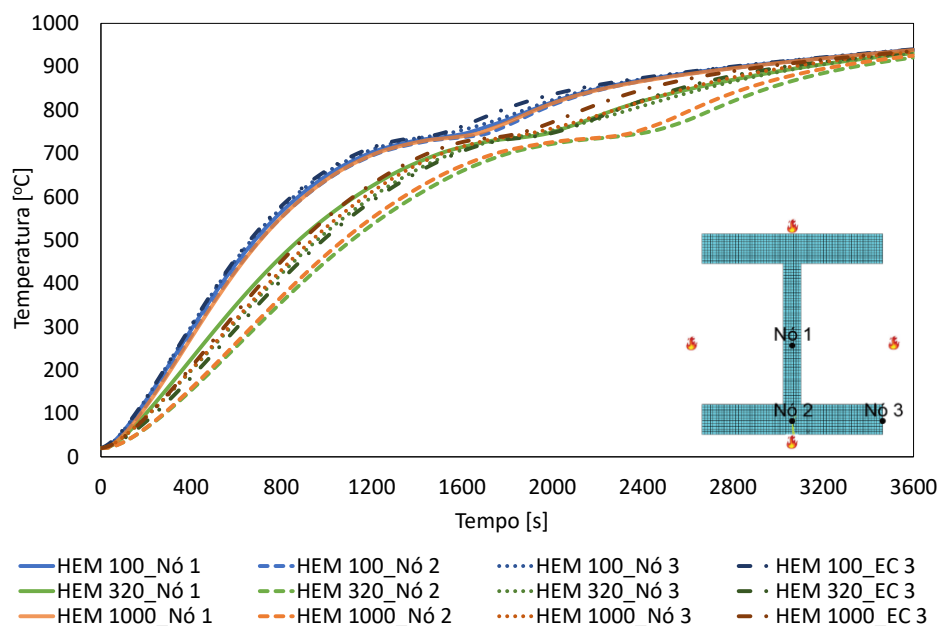


Figura 7.21 - Temperatura dos perfis HEM expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

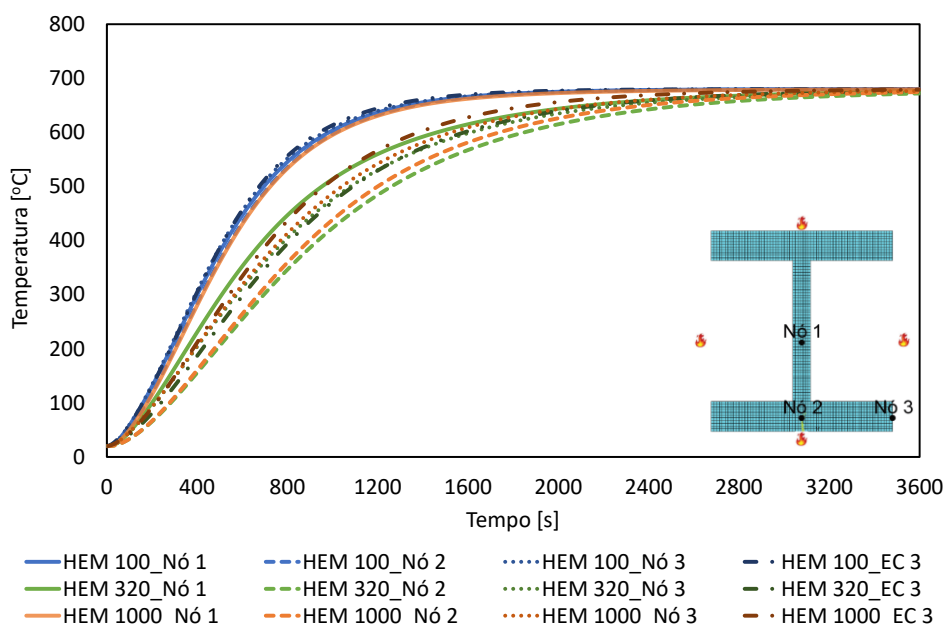


Figura 7.22 - Temperatura dos perfis HEM expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

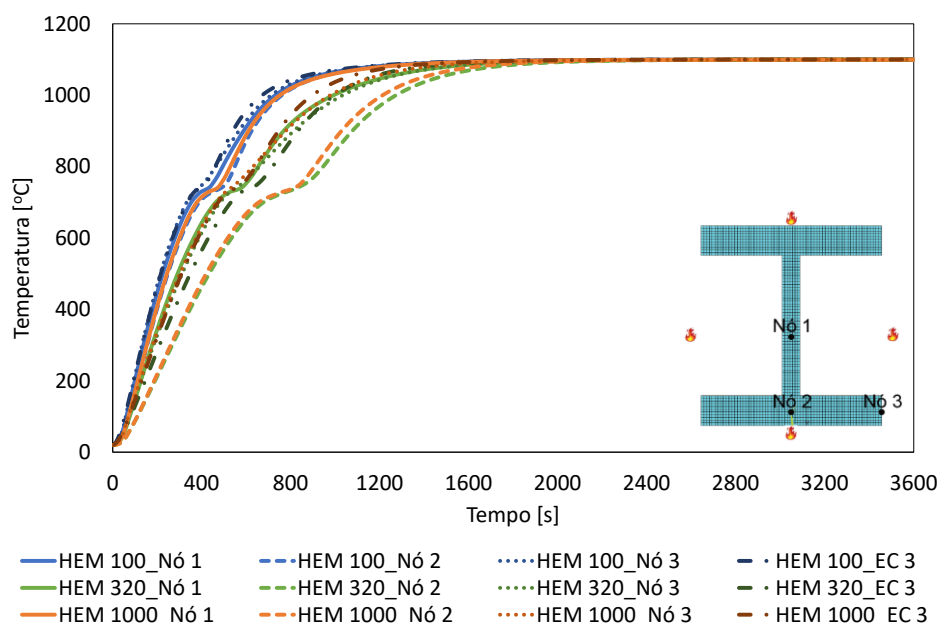


Figura 7.23 - Temperatura dos perfis HEM expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

Para esta gama de perfis, foram comparados os resultados obtidos pelo método numérico e analítico proposto pelo Eurocódigo 3, tendo sido verificado que, à semelhança do observado com os IPE, os resultados obtidos pelo método numérico são semelhantes aos do simplificado quando os perfis possuem uma secção pequena, como é o caso do HEM 100. Com o aumento da secção transversal e consequentemente dos gradientes térmicos, os resultados obtidos pelos dois métodos deixam de convergir. No entanto, os valores de temperatura obtidos pelo método simplificado podem ser considerados como valores médios dos obtidos pelo método numérico.

Foi constatado ainda que a distribuição de temperaturas na secção transversal do perfil HEM 1000 varia de forma acentuada. Principalmente, nos instantes iniciais, chegando a variações superiores a 200°C. Apesar deste perfil respeitar a condição imposta pelo Eurocódigo 3, que limita a utilização do método analítico a perfis com fatores de massividade inferiores a 10 m^{-1} , é necessário ter especial atenção nos perfis com secções elevadas, como o caso do HEM 1000. No entanto, para o instante de tempo de 3600 segundos, o gradiente de temperaturas pode ser desprezado para qualquer curva de incêndio nominal e qualquer perfil desta gama.

Por fim, verificou-se que a secção reta do perfil que regista o maior valor de temperatura, ao contrário do que acontece com os perfis IPE, varia entre a extremidade do banzo (Nó 3) e a zona central da alma (Nó 1). Esta variação depende da curva de incêndio a que o perfil está exposto e do instante de tempo. Por exemplo, o perfil HEM 360, exposto à curva de Hidrocarbonetos, regista a temperatura mais elevada aos 900 segundos no centro da alma e aos 1800 segundos a temperatura mais elevada dá-se na

extremidade do banzo. No entanto, a região que regista menores temperaturas é o centro do banzo, para qualquer perfil, exposto a qualquer curva de incêndio nominal.

Até este momento, foram analisados perfis em I. Posteriormente, foram analisados perfis com diferentes formatos, perfis L e UAP. Desta forma foi possível verificar a influência destas gamas de perfis nas análises térmicas de ambos os métodos e na formação de gradientes térmicos na secção transversal do perfil.

Foram analisados três perfis L com abas de igual comprimento e secções transversais crescentes, expostos à curva de incêndio nominal ISO 834 (Figura 7.24), de Elementos Exteriores (Figura 7.25) e de Hidrocarbonetos (Figura 7.26).

Mais uma vez, foi verificado que, com o aumento da secção transversal a variação da distribuição de temperaturas ao longo da secção transversal também aumenta. No entanto, os gradientes térmicos obtidos são pouco significativos em qualquer instante de tempo. Isto acontece devido à secção transversal desta gama de perfis não ser tão elevada como nos IPE e HEM. Também o facto de as abas possuírem comprimentos iguais e a espessura ser a mesma em toda a extensão do perfil, contribui para a obtenção de gradientes térmicos baixos. É de notar ainda que, para uma exposição ao fogo de 3600 s, a distribuição de temperaturas nesse instante pode ser considerada constante para qualquer perfil desta gama, exposto a qualquer curva de incêndio nominal.

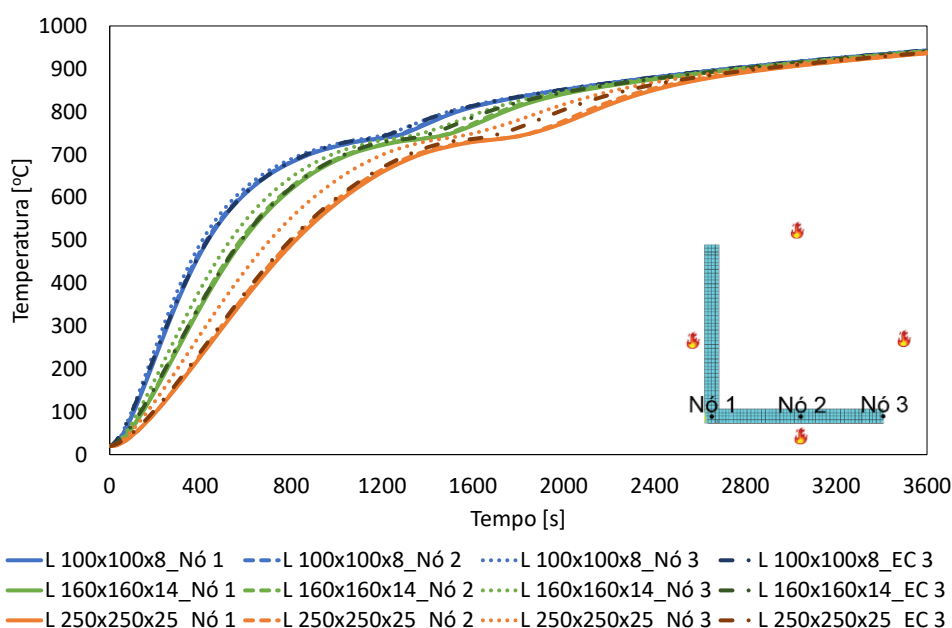


Figura 7.24 - Temperatura dos perfis L expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

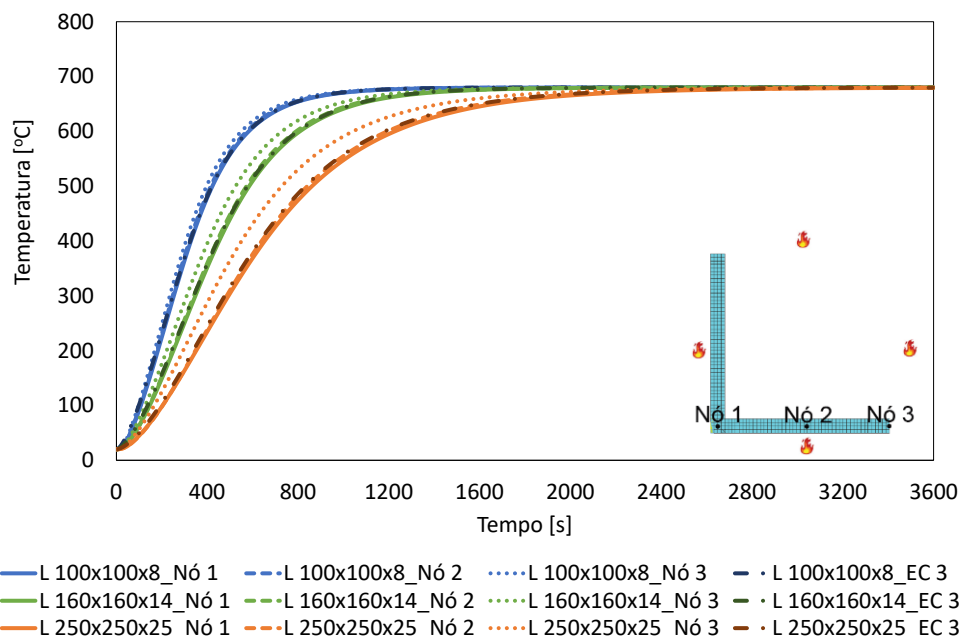


Figura 7.25 - Temperatura dos perfis L expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

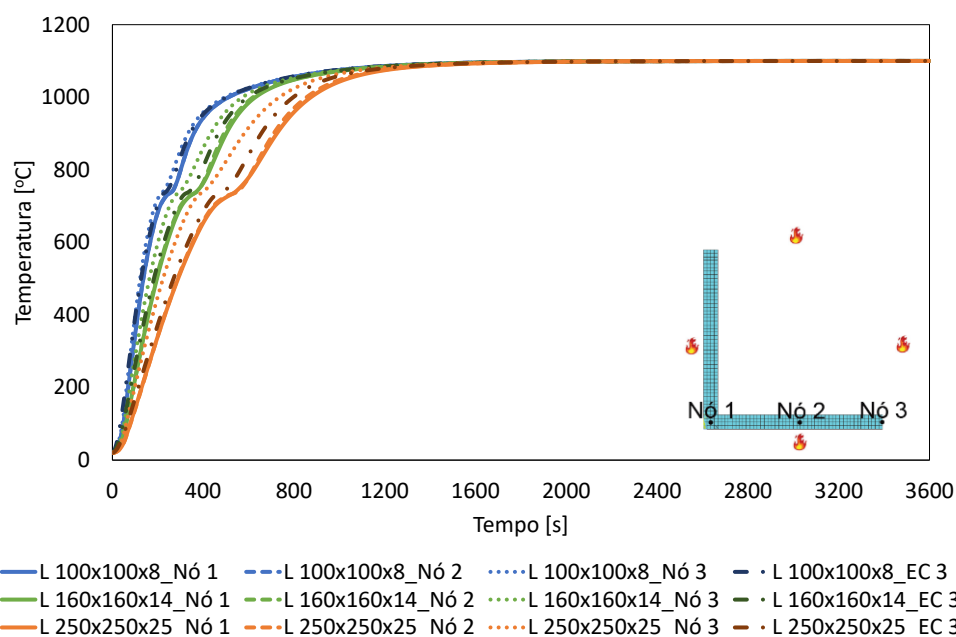


Figura 7.26 - Temperatura dos perfis L expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

Consequentemente, as curvas de temperatura obtidas através do método numérico, para os diferentes pontos nodais do perfil, convergem significativamente melhor com a obtida pelo método do Eurocódigo 3. No entanto, para secções transversais maiores, como é o caso do perfil L 250x250x25, ainda existem algumas discrepâncias entre os dois métodos nos instantes iniciais do aquecimento.

Por último, averiguou-se que esta tipologia de perfis atinge temperaturas mais elevadas nas extremidades das abas (Nó 3) e que essas temperaturas possuem valores muito próximos das temperaturas na zona central (Nó 2). As temperaturas mais baixas são atingidas na união das duas abas (Nó 1).

Por ultimo, analisaram-se os resultados obtidos para perfis UAP, que possuem um formato em C, expostos à curva de incêndio nominal ISO 834 (Figura 7.27), de Elementos Exteriores (Figura 7.28) e de Hidrocarbonetos (Figura 7.29).

A análise desta gama de perfis demonstrou que o perfil UAP 80 possui uma distribuição de temperaturas que pode ser considerada constante, uma vez a temperatura determinada através do método numérico nos diferentes pontos nodais é convergente. A análise dos perfis UAP 200 e UAP 300, verificou-se a existência de gradientes térmicos, principalmente nos primeiros instantes de tempo com aquecimento mais severo. À semelhança das diferentes gamas de perfis já analisadas, também é possível afirmar que, para os perfis UAP, quando maior for a secção transversal, maior será a variação de temperatura.

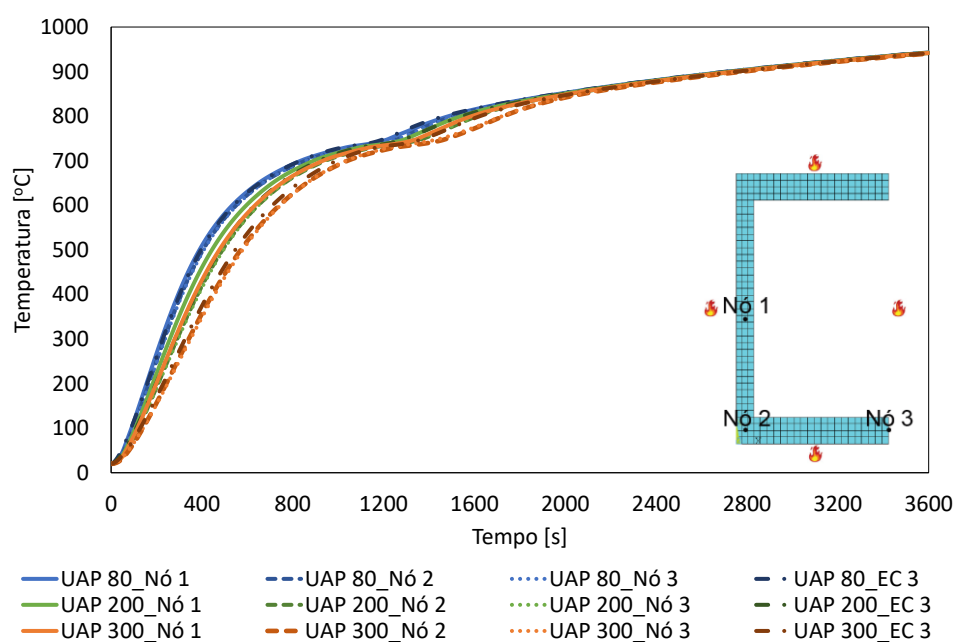


Figura 7.27 - Temperatura dos perfis UAP expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

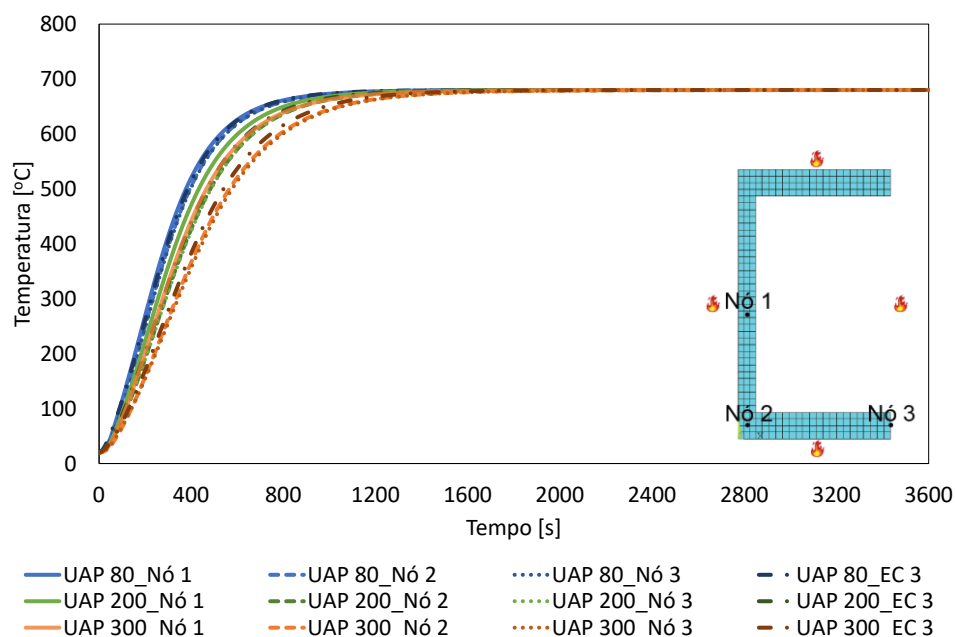


Figura 7.28 - Temperatura dos perfis UAP expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

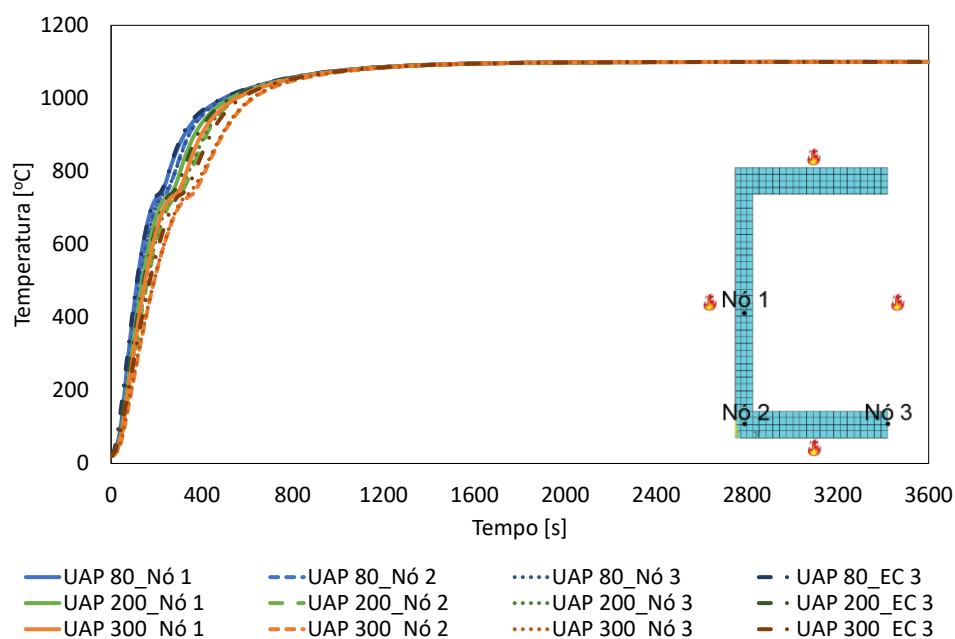


Figura 7.29 - Temperatura dos perfis UAP expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

Em relação à convergência do método numérico com o simplificado, verificou-se que estes obtêm resultados semelhantes, principalmente para instantes de tempos superiores a 1800 s de exposição ao fogo, uma vez que, a partir desse instante a distribuição de temperatura pode ser considerada uniforme, para qualquer uma das curvas de incêndio. Ainda é de notar que para os instantes iniciais de exposição ao fogo, quando o aquecimento dos perfis é mais severo, é possível considerar que o método do

Eurocódigo 3 equivale a uma medida dos pontos nodais estudados para o método numérico.

Por fim, é possível verificar que este tipo de perfis atinge a maior temperatura na zona central da alma (Nó 1), devido à sua baixa espessura da alma. A menor espessura é atingida no centro do banzo, uma vez que o banzo é a secção do perfil que possui maior espessura.

7.2 PERFIS EM AÇO PROTEGIDOS

Para realizar o estudo sobre a influência da utilização da proteção passiva na resistência térmica dos perfis em aço, analisaram-se as curvas da evolução da temperatura para os mesmos perfis, expostos às três curvas de incêndio nominal e protegidos com placas de gesso do tipo F de 20 mm. Foram obtidas as evoluções de temperatura nos três pontos distintos de cada perfil. O principal objetivo destas análises é averiguar qual o benefício da utilização da proteção passiva na resistência térmica dos perfis, e verificar se a espessura de 20 mm de gesso é suficiente para que as temperaturas no perfil não alcancem os 500°C numa exposição ao fogo de 1 hora, segundo as curvas de incêndio nominal. De seguida, outro objetivo foi verificar a variação da temperatura na secção transversal do perfil e determinar qual a secção do perfil que atinge as temperaturas mais elevadas. Por último, é verificada a influência da utilização das propriedades térmicas do gesso não lineares na análise de perfis protegidos.

Para avaliar a evolução das temperaturas dos perfis IPE protegidos, foram analisados os mesmos três perfis (IPE 100, 300 e 600), expostos ao fogo segundo a curva de incêndio nominal ISO 834 (Figura 7.30), de Elementos Exteriores (Figura 7.31) e de Hidrocarbonetos (Figura 7.32).

É possível verificar que a utilização das placas de gesso em caixão melhora significativamente a resistência térmica ao fogo dos perfis IPE, uma vez que os valores de temperatura obtidos para os perfis protegidos são bastante menores. Por exemplo, o perfil IPE 100, que possui a menor resistência térmica desta gama de perfis, para uma exposição ao fogo de 1 hora segundo a curva de incêndio nominal ISO 834, atinge uma temperatura máxima de 943,8°C. No entanto, para o mesmo perfil protegido, a temperatura máxima atingida é de 262,4°C, o que resulta numa diminuição temperatura de 771,4°C.

Ainda foi constatado que a utilização de placas de gesso do tipo F com 20 mm de espessura é suficiente para que qualquer perfil desta gama, exposto a qualquer curva de incêndio nominal, não ultrapasse os 500°C. No entanto, o perfil IPE 100 atinge a temperatura máxima de 407°C para a curva de Hidrocarbonetos, no instante de 3600 s, o que já é bastante próximo da temperatura crítica admitida.

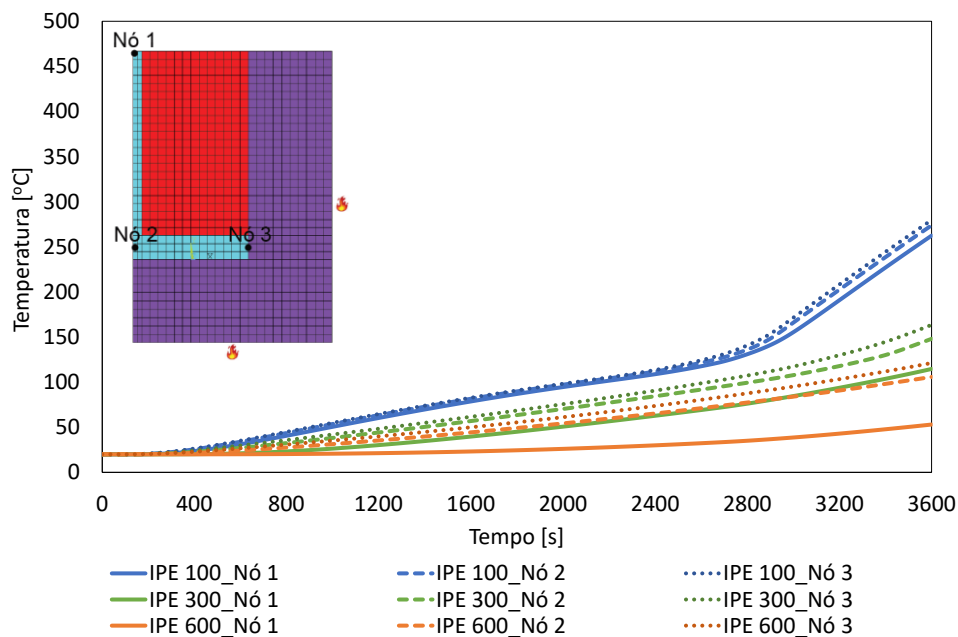


Figura 7.30 - Temperatura dos perfis IPE protegidos expostos à curva de incêndio nominal ISO 834

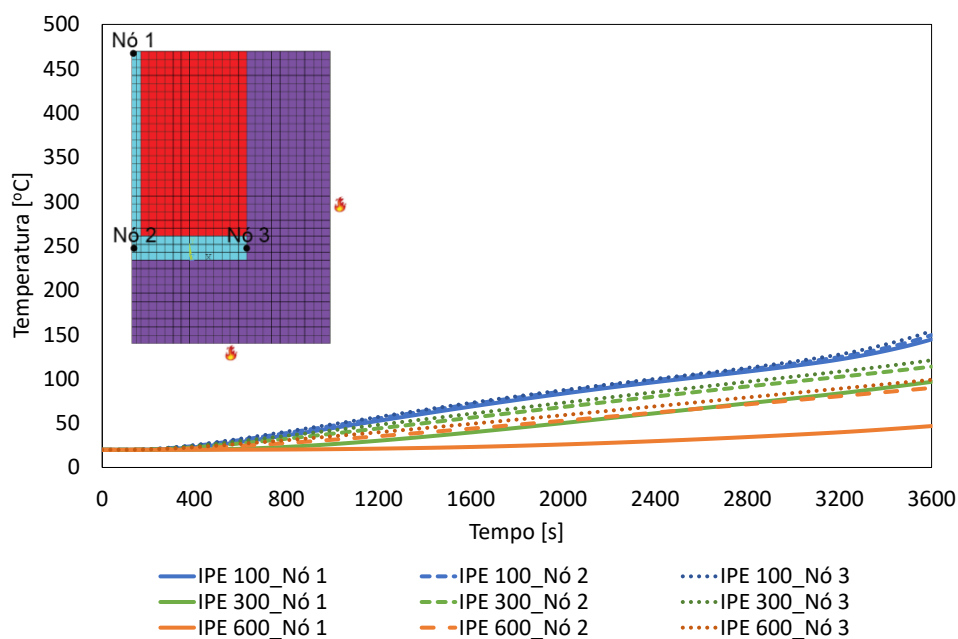
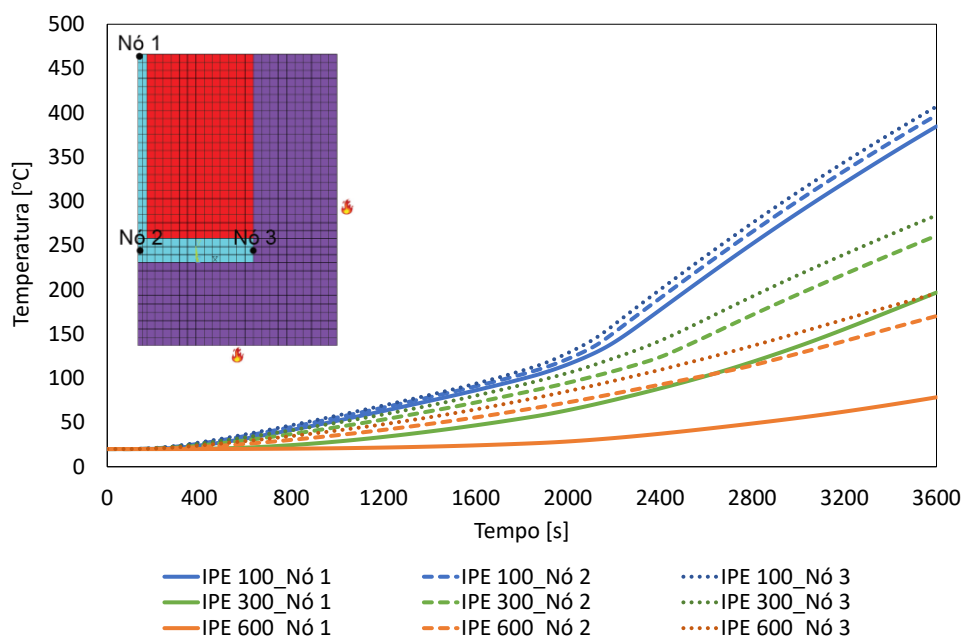


Figura 7.31 - Temperatura dos perfis IPE protegidos expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores



A análise que se segue diz respeito à influência da secção transversal na resistência térmica dos perfis protegidos. Analisando as evoluções de temperatura dos diferentes perfis, é possível constatar que quanto maior a secção transversal, maior é a resistência térmica dos perfis, uma vez que o IPE 100 regista valores superiores comparativamente com o IPE 600.

Por fim, foram comparadas as evoluções de temperatura para cada ponto nodal, tendo sido verificado que existem gradientes térmicos elevados entre nó 1 e o nó 3, principalmente para perfis com secções transversais maiores, como é o caso do IPE 600. Ao contrário do que acontece com os perfis não protegidos, a variação da temperatura na secção transversal do perfil aumenta com o tempo decorrido de exposição.

Para os perfis da gama HEM, foram analisados os perfis HEM 100, 320 e 1000 expostos às três curvas de incêndio nominal. Inicialmente, estudou-se o comportamento térmico dos três perfis nos três pontos nodais. Analisando o perfil HEM 100 verificou-se que este, sem proteção, atinge temperaturas máximas, aos 3600 segundos, de 940,3°C, 679,8°C e 1099,9°C quando sujeito às curvas de incêndio ISO 834, de Elementos Exteriores e de Hidrocarbonetos, respetivamente, conforme a Figura 7.33, Figura 7.34 e Figura 7.35. No entanto, com proteção, apresenta temperaturas máximas, também aos 3600 segundos, de 174,8°C, 117,3°C e de 261,8°C, para as mesmas curvas de incêndio. Deste modo, é possível afirmar que a utilização das placas de gesso como proteção passiva melhora excecionalmente a resistência térmica desta gama de perfis ao fogo.

Para a exposição ao fogo segundo as três curvas de incêndio nominal, verifica-se também que nenhum dos perfis ultrapassa a temperatura crítica de 500°C.

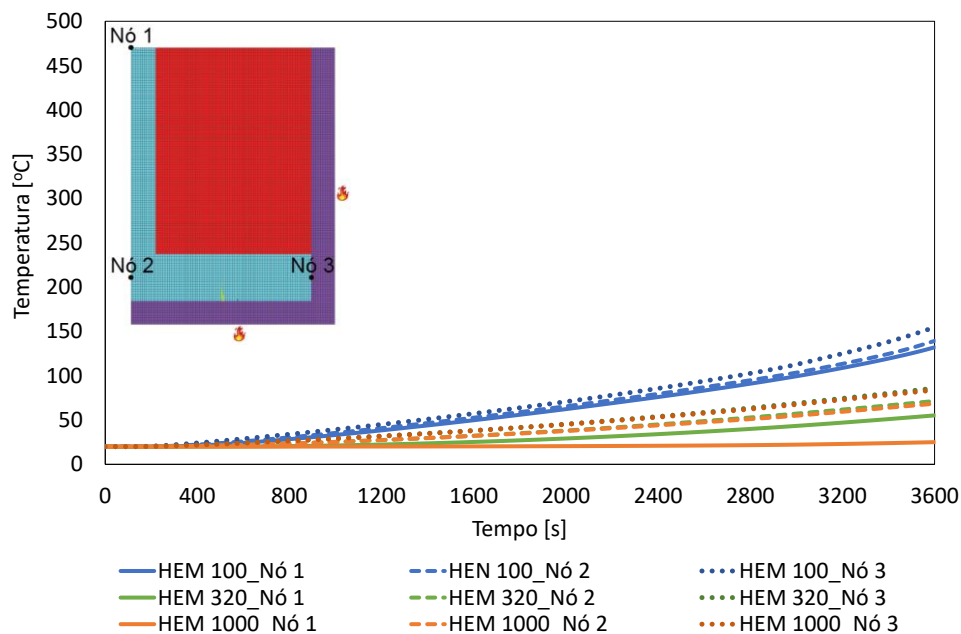


Figura 7.33 - Temperatura dos perfis HEM protegidos expostos à curva de incêndio nominal ISO 834

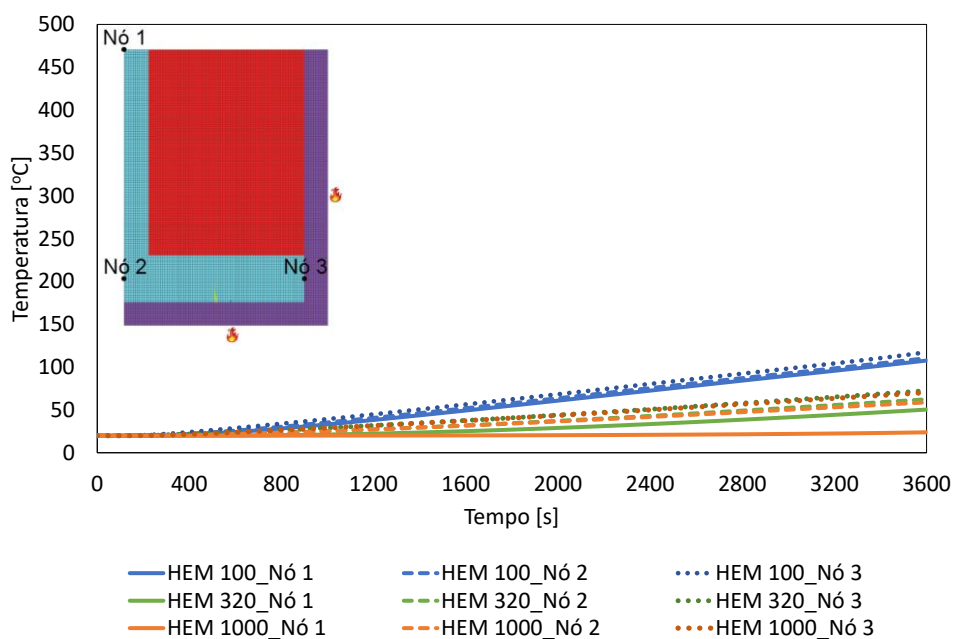


Figura 7.34 - Temperatura dos perfis HEM protegidos expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores

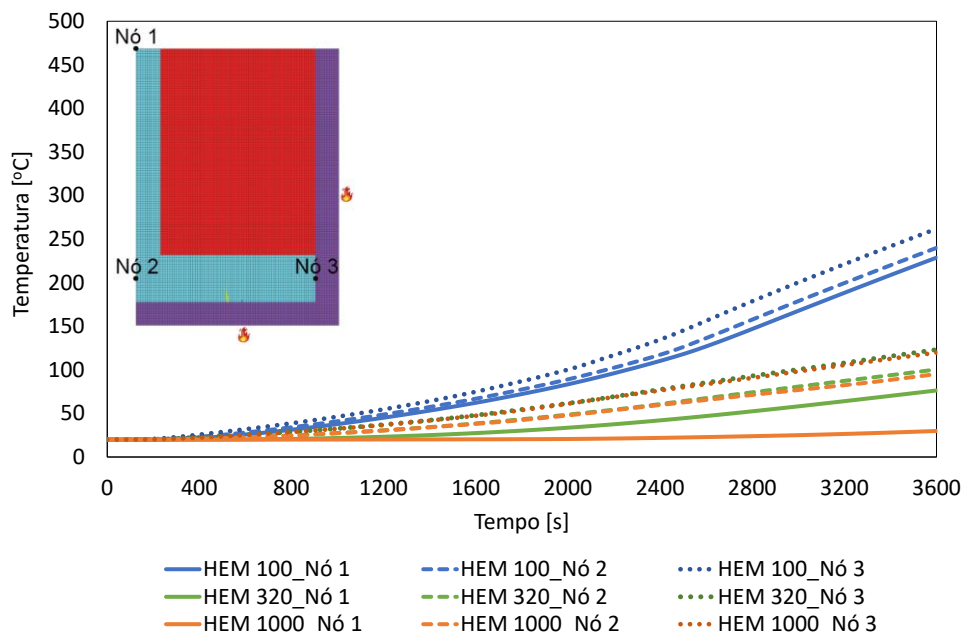


Figura 7.35 - Temperatura dos perfis HEM protegidos expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos

Considerando a média das curvas de evolução de temperaturas dos três pontos nodais analisados de cada perfil protegido, verifica-se que o perfil HEM 100 é o perfil que possui a pior resistência ao fogo, uma vez que atinge temperaturas mais elevadas durante toda a exposição ao fogo. No entanto, ao contrário do que acontece com os perfis não protegidos, o HEM 1000 é o perfil que apresenta melhor resistência ao fogo, pois atinge temperaturas menores do que os restantes perfis desta gama para todo o intervalo de tempo de exposição. Assim, conclui-se que, quanto maior a secção transversal do perfil, maior a resistência ao fogo.

Relativamente à variação da distribuição de temperaturas na secção transversal, a análise das curvas de evolução de temperatura dos diferentes pontos nodais estudados para as diferentes curvas de incêndio demonstra imediatamente, que existem variações de temperatura significativas na secção transversal do perfil e que essa variação aumenta com o aumento da secção transversal do perfil e com o decorrer do tempo de exposição ao fogo. Na Figura 7.36, é possível verificar as variações de temperatura que ocorrem na secção transversal de cada perfil para cada curva de incêndio, aos 3600 segundos. Ainda é de notar que a severidade da curva influencia as variações de temperatura, uma vez que é mais elevada para a curva de Hidrocarbonetos.

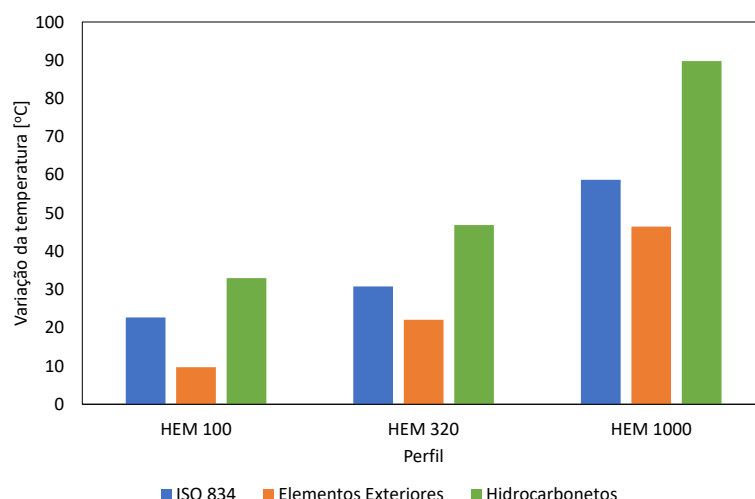


Figura 7.36 – Variação da temperatura máxima na secção transversal dos perfis HEM

Por último, verifica-se que o nó 3 (extremidade do banzo) é o ponto do perfil que atinge temperaturas mais elevadas, uma vez que está em contacto direto com as placas de gesso. Os pontos que atingem menores temperaturas é o nó 1 (centro da alma).

Para a gama L foram analisados os mesmos perfis (L 100x100x8, L 160x160x14 e L 250x250x25), com o intuito de averiguar o benefício da utilização de gesso como proteção. À semelhança das análises realizadas, para cada um destes perfis foram simuladas situações de incêndio de acordo com a curva de incêndio nominal ISO 834 (Figura 7.37), a curva de Elementos Exteriores (Figura 7.38) e, por último, a curva de Hidrocarbonetos (Figura 7.39).

Analisando as curvas de temperatura para estes perfis, verifica-se facilmente que os perfis atingem as temperaturas máximas aos 3600 s em todos os cenários de exposição ao fogo. Outro dado importante é que o perfil L 100x100x8 apresenta temperaturas mais elevadas durante todo o intervalo de tempo de exposição ao fogo. Já o L 250x250x25 apresenta a distribuição de temperaturas com valores mais baixos. Assim, é possível, mais uma vez, concluir que quanto maior a secção transversal do perfil, menor as temperaturas desenvolvidas, ou seja, maior a resistência ao fogo do perfil.

Para averiguar o benefício da utilização de placas de gesso como proteção passiva para esta gama de perfis, analisaram-se as temperaturas desenvolvidas no perfil L 100x100x8 durante a exposição ao fogo, uma vez que este é o perfil com menor resistência ao fogo. Verificou-se que este, sem proteção, atinge temperaturas máximas de 943,3°C, 680,0°C e de 1099,9°C, quando sujeito à ação do fogo segundo a curva ISO 834, de Elementos Exteriores e de Hidrocarbonetos, respetivamente. Por outro lado, com proteção o perfil apresenta temperaturas máximas de 235,4°C, 151,7°C, e 409,1°C, para as mesmas curvas de incêndio. Por conseguinte, confirma-se que a utilização da proteção passiva beneficia significativamente a resistência ao fogo dos perfis. Verifica-se ainda, que nenhum dos perfis atinge temperaturas superiores a 500°C para uma exposição ao fogo

de 1 hora, revelando assim que uma espessura de 20 mm de placas de gesso é suficiente para qualquer perfil desta gama cumprir os requisitos mínimos de segurança contra o fogo.

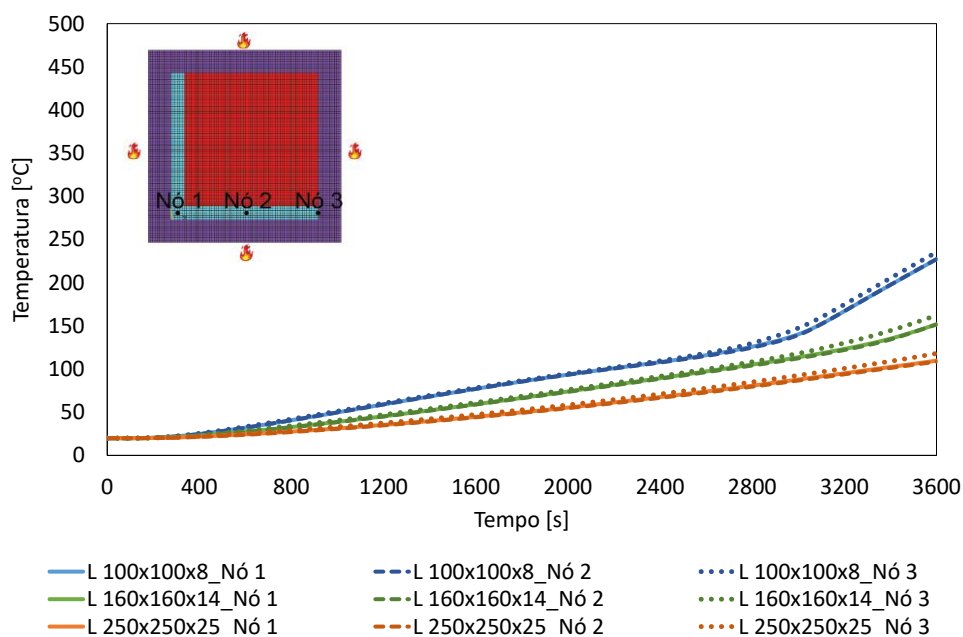


Figura 7.37 - Temperatura dos perfis L protegidos expostos à curva de incêndio nominal ISO 834

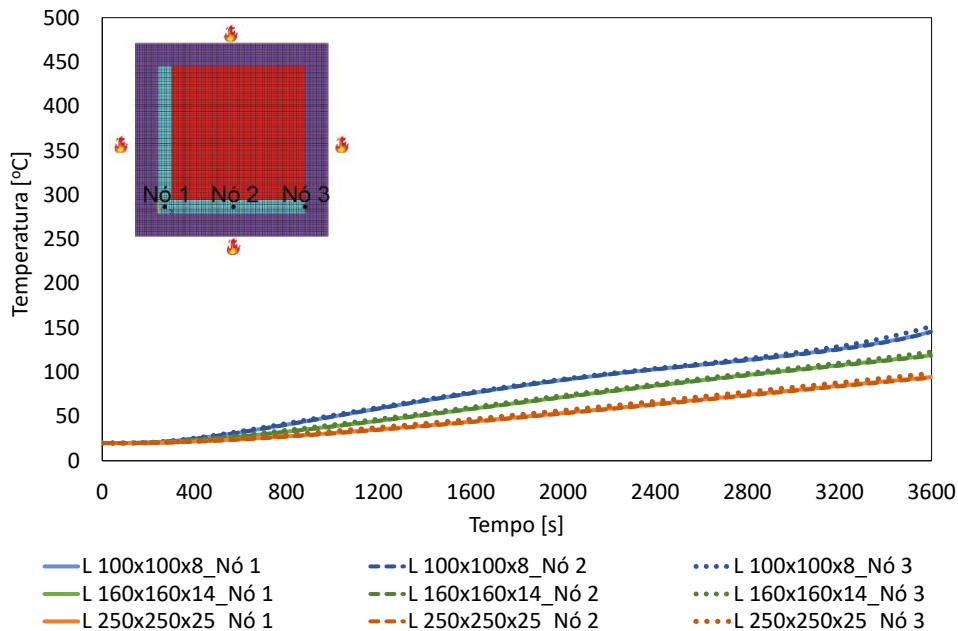


Figura 7.38 - Temperatura dos perfis L protegidos expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores

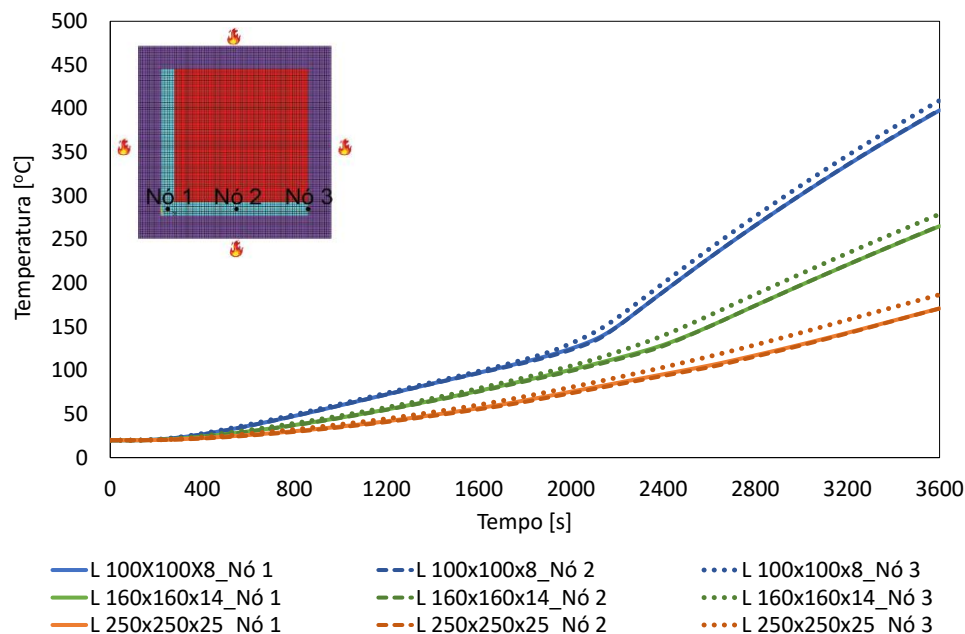


Figura 7.39 - Temperatura dos perfis L protegidos expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos

Ao contrário do que é observado para os perfis IPE e HEM, esta gama possui variações de temperaturas pouco significativas, conforme a Figura 7.40. Estas variações pouco significativas ocorrem devido ao facto de os perfis possuírem a mesma espessura em toda a sua extensão, as abas possuírem o mesmo comprimento e a sua área de secção transversal ser baixa quando comparada com os IPE e HEM. Estes fatores permitem que o fluxo de calor por condução que atravessa o perfil seja o mesmo para toda a sua extensão. No entanto, não é verificado um padrão de linearidade entre o tamanho da secção transversal destes perfis e a variação da temperatura.

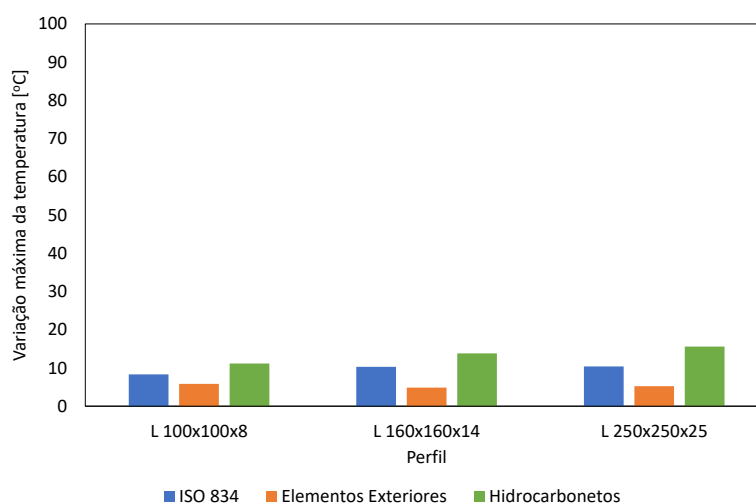


Figura 7.40 - Variação da temperatura máxima na secção transversal dos perfis L

Para o estudo dos perfis UAP protegidos analisaram-se, mais uma vez, três perfis desta gama (UAP 80, UAP 200 e UAP 300), sob ação do fogo segundo as curvas de incêndio nominal ISO 834 (Figura 7.41), de Elementos Exteriores (Figura 7.42) e de

Hidrocarbonetos (Figura 7.43). Considerando as curvas de temperatura para cada perfil, verifica-se que o perfil UAP 80 apresenta valores de temperatura mais elevados do que os restantes, enquanto o UAP 300 regista o menor desenvolvimento de temperaturas na secção transversal. Estes resultados evidenciam, mais uma vez, que quanto maior o tamanho da secção transversal, menor o desenvolvimento de temperaturas.

O perfil UAP 80 foi selecionado para averiguar a melhoria da resistência ao fogo dos perfis com a utilização de placas de gesso como proteção. A análise das temperaturas máximas para este perfil com e sem proteção demonstrou melhorias bastante significativas na resistência ao fogo do aço com a utilização de placas de gesso, uma vez que a temperatura máxima atingida diminui 643,3°C quando sujeito à curva ISO 834, 499,5°C para a curva de Elementos Exteriores e 618,3°C para a curva de Hidrocarbonetos. Constatou-se também, que a temperatura máxima alcançada em todos os perfis desta gama não ultrapassa os 500°C. Por outro lado, o perfil UAP 80, exposto à curva de Hidrocarbonatos, atinge uma temperatura máxima de 481,6°C, evidenciando que a utilização de 20 mm de espessura de gesso pode comprometer o elemento estrutural uma vez que a temperatura máxima atingida é próxima da admissível.

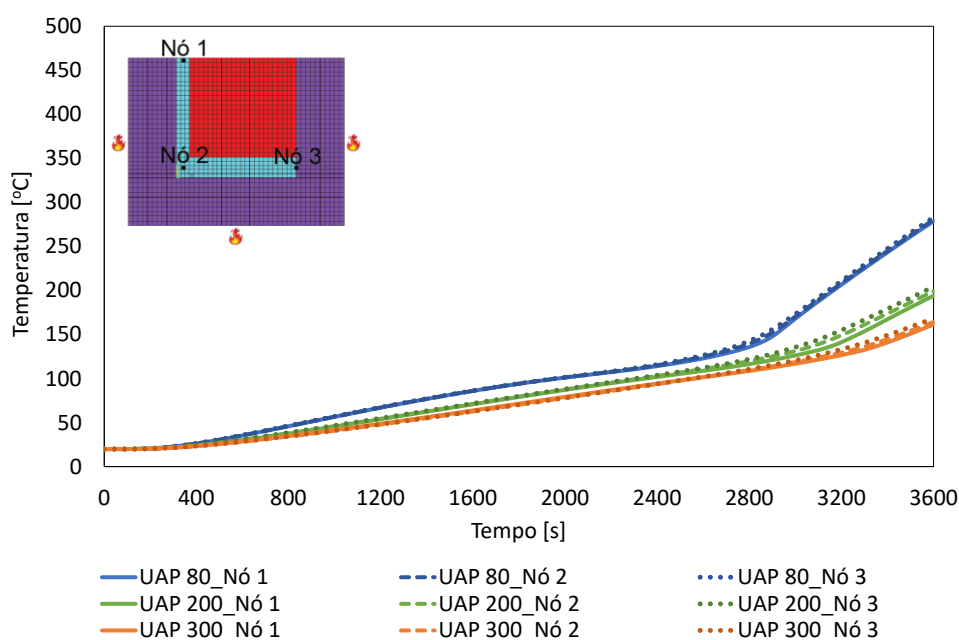


Figura 7.41 - Temperatura dos perfis UAP protegidos expostos à curva de incêndio nominal ISO 834

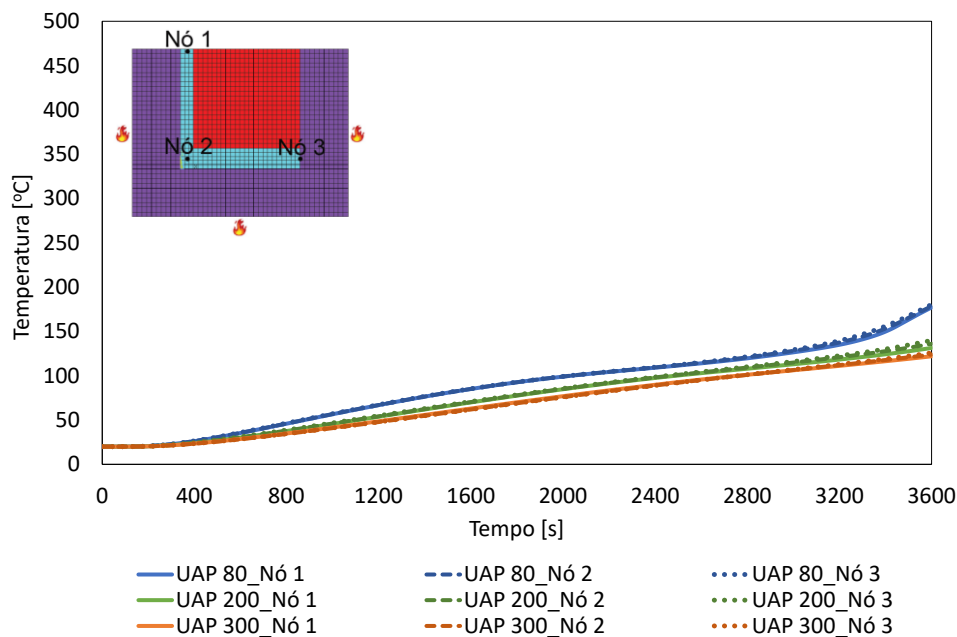


Figura 7.42 - Temperatura dos perfis UAP protegidos expostos à curva de incêndio nominal de Elementos Exteriores

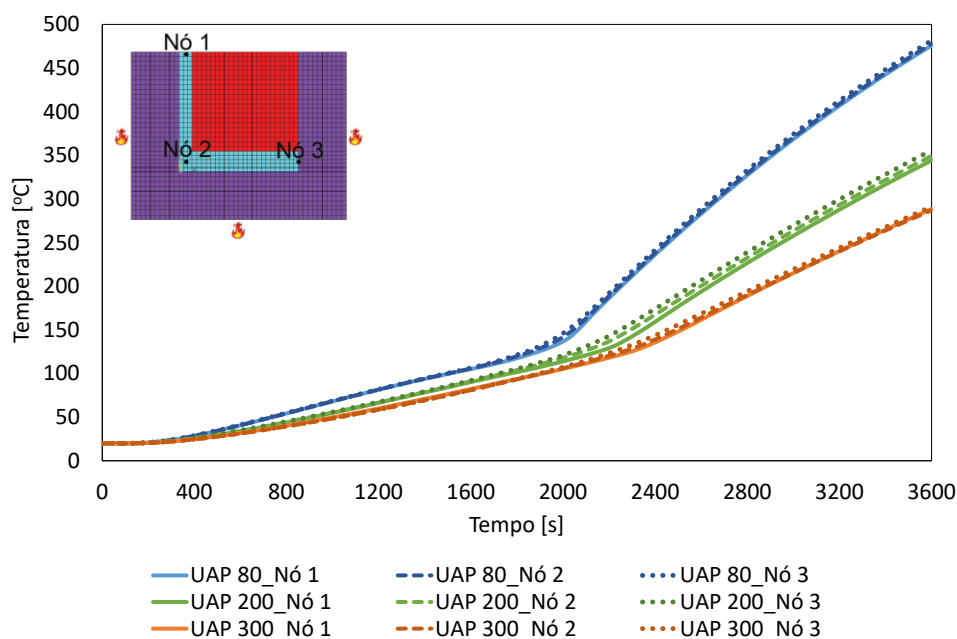


Figura 7.43 - Temperatura dos perfis UAP protegidos expostos à curva de incêndio nominal de Hidrocarbonetos

A análise das curvas de temperatura para os diferentes pontos nodais demonstra que os perfis UAP apresentam variações de temperatura na secção transversal pouco significativas, uma vez que as curvas para cada nó possuem boa concordância. Tal como observado na Figura 7.44, a variação de temperatura máxima é pouco significativa, quando comparada com as variações obtidas pelos perfis IPE e HEM. A principal razão para este fenómeno acontecer é que estes perfis possuem secções retas com espessuras semelhantes, o que faz com que o fluxo de calor que atravessa o perfil seja semelhante

em todas as secções do perfil. No entanto, o aumento da secção transversal não influencia o aumento da variação da temperatura nesta gama.

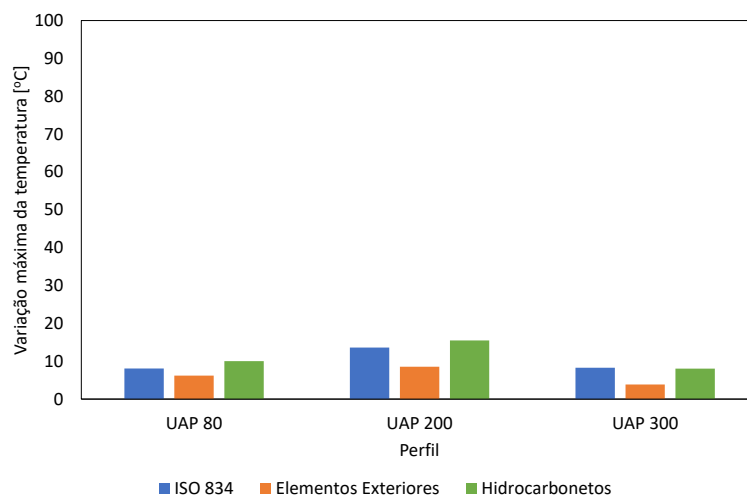


Figura 7.44 - Variação da temperatura máxima na secção transversal dos perfis UAP

Por último, a análise prendeu-se com a influência da utilização de diferentes modelações do comportamento do gesso (propriedades não lineares e propriedades constantes) na análise térmica de perfis protegidos. Analisaram-se as curvas de temperatura para o perfil IPE 100 segundo a curva ISO 834, para o ponto nodal 1, tendo em consideração os dois tipos de propriedades, conforme observado na Figura 7.45. Foi verificada uma grande discrepância entre os resultados obtidos. A evolução das temperaturas que contemplou a modelação com propriedades constantes regista valores bastante mais elevados que a obtida com a utilização das propriedades não lineares, o que evidencia uma abordagem mais conservadora com a modelação com propriedades constantes.

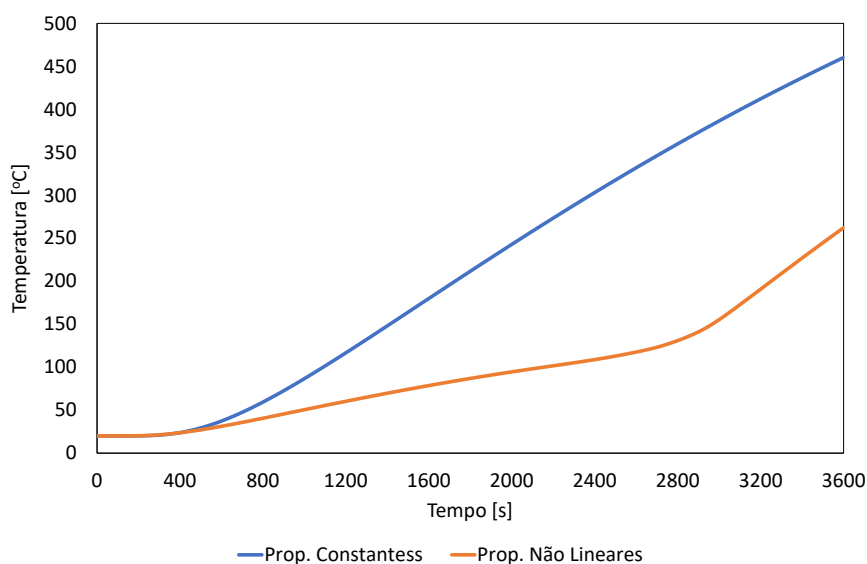


Figura 7.45 - Temperatura do perfil IPE 100 exposto à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre a utilização das propriedades térmicas não lineares e das propriedades constantes

Verificou-se ainda que a modelação com propriedades constantes do gesso na análise de perfis protegidos provoca a obtenção de curvas de temperaturas com declive constante para todo o tempo de exposição, enquanto a curva que contempla a utilização das propriedades não lineares sofre um aumento no declive quando atinge 150°C.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TABALHOS FUTUROS

- 8.1 CONCLUSÕES
- 8.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

8 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

8.1 CONCLUSÕES

O desenvolvimento desta dissertação prendeu-se com a utilização de duas metodologias distintas para a realização de análises térmicas de perfis de aço sob a ação do fogo. Uma metodologia foi analítica, para qual as análises térmicas foram realizadas utilizando dois métodos distintos: o Método Simplificado preconizado pelo Eurocódigo 3 - Parte 1-2, que tem como base as normas atualmente em vigor na Europa, e o Método da Capacitância Global, que assenta nas equações simplificadas da transferência de calor para sólidos, cujo comportamento térmico pode ser considerado uniforme durante o processo de aquecimento. A utilização destes dois métodos serviu como suporte para verificar a validade do Método da Capacitância Global relativamente ao Método Simplificado do Eurocódigo 3. A outra metodologia foi a numérica, que através de uma análise térmica em regime transiente, possibilita a determinação da distribuição de temperaturas na secção transversal dos perfis.

Relativamente à utilização dos métodos analíticos, foi possível verificar que o Método da Capacitância Global pode ser utilizado em fase de projeto para a determinação das curvas de temperatura para perfis submetidos à ação do fogo, uma vez que os resultados obtidos são concordantes com os do Método Simplificado preconizado pelo Eurocódigo 3 para os perfis das gamas estudadas.

Com as análises térmicas realizadas através dos métodos analíticos, foi possível concluir que, quanto menor for o fator de massividade do perfil, menores são as temperaturas desenvolvidas na secção transversal do perfil durante a exposição ao fogo. O fator de massividade diminui com o aumento do tamanho da secção para todas as gamas de perfis estudadas, exceto para os perfis HEM. Assim, constata-se que o perfil com maior resistência ao fogo é de maior secção transversal, excepto para os perfis HEM, uma vez que o HEM 1000 apresenta temperaturas mais elevadas que o HEM 320.

A consideração das propriedades térmicas constantes do aço não revela discrepâncias significativas para obtenção das curvas de evolução da temperatura quando comparadas com as obtidas considerando as propriedades não lineares. No entanto, a utilização de propriedades constantes revela uma análise mais conservativa para tempos mais elevados de exposição ao fogo e não é considerada a mudança de fase do aço.

Apesar de os métodos analíticos considerarem uma distribuição de temperaturas constante ao longo da secção transversal do perfil, os resultados obtidos pelas simulações numéricas demonstraram a existência de gradientes térmicos na secção e que estes aumentam com o aumento do tamanho da secção do perfil. Esses gradientes térmicos também aumentam de acordo com a severidade da curva de incêndio a que o perfil é sujeito. No entanto, para uma exposição ao fogo de 60 minutos, a distribuição de temperaturas na secção do perfil pode ser considerada constante nesse instante de tempo.

O Método Simplificado preconizado pelo Eurocódigo 3 não evidenciou ser um método conservativo, tendo sido obtido boa concordância entre este e o método numérico para perfis com secções transversais menores. Para perfis com secções transversais maiores é possível considerar que o Método Simplificado equivale à média dos três pontos nodais estudados no numérico. Verificou-se ainda que as secções retas dos perfis com espessuras menores atingem temperaturas mais elevadas, concluindo assim que as almas dos perfis atingem temperaturas superiores e os banzos temperaturas menores, para os perfis IPE, HEM e UAP. Os perfis L, por possuírem espessuras iguais nas duas abas, a distribuição de temperaturas pode ser considerada uniforme para toda a secção transversal o perfil.

As placas de gesso dispostas em caixão demonstraram ser um ótimo isolante térmico auferindo um aumento significativo na resistência ao fogo dos perfis, mantendo a temperatura do aço, inferior a 500°C, para todas as curvas de incêndio nominal, numa exposição ao fogo de 1 hora. A espessura de 20 mm para as placas de gesso mostrou ser suficiente para atingir a resistência térmica imposta por algumas normas europeias, no entanto, a resistência ao fogo e o custo do projeto podem ser melhorados se a espessura de proteção for dimensionada corretamente.

As curvas de evolução das temperaturas nos diferentes pontos nodais estudados para cada perfil protegido evidenciaram que, quanto maior o tamanho do perfil, menor a temperatura desenvolvida na secção transversal do mesmo.

Relativamente à variação da temperatura na secção transversal dos perfis protegidos, verificou-se que, para as gamas IPE e HEM, à medida que o tamanho da secção perfil aumenta, mais significativos são gradientes térmicos, enquanto para as gamas L e UAP essa tendência não é verificada.

A modelação com as propriedades constantes do gesso propostas pelo Comité Técnico Europeu ECCS nas simulações numéricas evidenciaram análises bastante mais conservativas quando comparadas com as que tiveram em conta as propriedades não lineares do gesso, obtidas através da literatura.

A modelação do ar nas cavidades formadas pela proteção conduziu a resultados mais próximos da realidade.

8.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, seria interessante analisar uma estrutura completa em aço sujeita à ação do fogo e comparar os resultados obtidos com os já existentes para elementos estruturais isolados.

Tendo em consideração que grande parte das normas atualmente em vigor são baseadas em ensaios experimentais de elementos isolados, é evidente o esforço e foco da comunidade científica em analisar o comportamento global ou de parte de estruturas, já que, de um modo geral, o desempenho de uma estrutura é significativamente superior ao de elementos estruturais isolados sob ação do fogo.

Outro tema interessante a ser explorado futuramente é a utilização de materiais inovadores para melhorar a resistência térmica de construções metálicas e comparar com os tradicionais, como as placas de gesso, estudadas nesta dissertação.

É notória a necessidade inerente da indústria de construção em aço em encontrar materiais inovadores e de custo mais baixo que assegurem os requisitos de segurança impostos pelas normas.

Entre os vários materiais disponíveis no mercado, destaca-se o isolamento térmico denominado de “*NanoWood*”, desenvolvido por investigadores na Universidade de Maryland, fabricado em madeira. Estes investigadores aproveitaram a capacidade da madeira de bloquear a transmissão de calor na direção transversal das fibras e, através de técnicas de nano engenharia, orientaram as fibras da madeira de forma a atenuar a transmissão de calor o máximo possível. Os investigadores afirmam que este material possui uma resistência térmica significativamente superior aos materiais de proteção convencionais e uma relação resistência/peso cerca de 8 vezes superior ao do aço, podendo suportar tensões até 13 MPa. Este material ainda reduz significativamente as necessidades de aquecimento das habitações, as emissões de CO₂, e é biodegradável [85]. Devido a estas propriedades, este material poderia facilmente traduzir-se numa solução viável na proteção de perfis em aço.

Por último, seria relevante realizar estudos experimentais para perfis sujeitos a cargas mecânicas simultaneamente expostos à ação do fogo, de forma a realizar análises termomecânicas com o objetivo de comparar os resultados obtidos com simulações numéricas.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

9 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] FEMA, *World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observations, and Recommendations*. Washinton, DC: Federal Emergency Management Agency, 2002.
- [2] P. Kotsovinos e A. Usmani, «The World Trade Center 9/11 Disaster and Progressive Collapse of Tall Buildings», *Fire Technology*, vol. 49, n. 3, pp. 741–765, Jul. 2013.
- [3] Y. C. Wang, *Steel and Composite Structures: Behaviour and Design for Fire Safety*, 1st ed. Nova York: CRC Press, 2002.
- [4] K. Hanses, *Basics Steel Construction*, 1st ed. Colónia: Birkhäuser, 2015.
- [5] P. Vila Real, *Incêndio em Estruturas Metálicas - Cálculo Estrutural*, 1st ed. Amadora: Edições Orion, 2003.
- [6] EN 1990, *Eurocode 0 - Basis of Structural Design*. Bruxelas: CEN, European Committee for Standardization, 2010.
- [7] A. S. Usmani, J. M. Rotter, S. Lamont, A. M. Sanad, e M. Gillie, «Fundamental Principles of Structural Behaviour Under Thermal Effects», *Fire Safety Journal*, vol. 36, n. 8, pp. 721–744, Nov. 2001.
- [8] J. A. Purkiss e L.-Y. Li, *Fire safety engineering design of structures*, 3rd ed. New York: CRC Press, 2013.
- [9] A. H. Buchanan e A. K. Abu, *Structural Design for Fire Safety*. Chichester: John Wiley & Sons, 2017.
- [10] V. Pignatta e Silva, «Determination of the Steel Fire Protection Material Thickness by an Analytical Process - A Simple Derivation», *Engineering Structures*, vol. 27, n. 14, pp. 2036–2043, Dez. 2005.
- [11] L. D. Kirchhof, «Uma Contribuição ao Estudo de Vigas Mistas Aço-Concreto Simplesmente Apoiadas em Temperatura Ambiente e em Situação de Incêndio», Dissertação apresentada à Universidade de São Carlos para obtenção do grau de mestre em Engenharia de Estruturas.
- [12] A. M. Claret, «Resistência ao Fogo de Vigas Mistas Aço-Concreto Modeladas pelo Método dos Elementos Finitos», *Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural*, 2000.
- [13] V. Babrauskas e R. B. Williamson, «The Historical Basis of Fire Resistance Testing

- Part I», *Fire Technology*, vol. 14, n. 3, pp. 184–194, Ago. 1978.
- [14] BS 476, «Fire Test on Building Materials and Structures», *British Standard Institution*, 1932.
- [15] G. Newman, «The Cardington Fire Tests», em *Proceedings of the North American Steel Construction Conference*, 1999.
- [16] M. Spearpoint, «Predicting the Temperatures of Steel Members in the Cardington Fire Tests Using the THELMA Finite Element Model», *Fire technology*, vol. 37, n. 2, pp. 109–128, 2001.
- [17] J.-M. Franssen, «Calculation of Temperature in Fire-Exposed Bare Steel Structures: Comparison Between ENV 1993-1-2 and EN 1993-1-2», *Fire Safety Journal*, vol. 41, n. 2, pp. 139–143, Mar. 2006.
- [18] L. Gardner e K. T. Ng, «Temperature Development in Structural Stainless Steel Sections Exposed to Fire», *Fire Safety Journal*, vol. 41, n. 3, pp. 185–203, Abr. 2006.
- [19] F. A. Ferreira, A. M. Claret, e A. Santolin, «Determinação da Distribuição de Temperatura em Perfis de Aço Parcialmente Protegidos: Método Simplificado», *Revista Escola de Minas*, vol. 60, n. 4, pp. 645–655, 2007.
- [20] F. Wald, J. Chloubá, A. Uhlíř, P. Kallerová, e M. Štujberová, «Temperatures During Fire Tests on Structure and its Prediction According to Eurocodes», *Fire Safety Journal*, vol. 44, n. 1, pp. 135–146, Jan. 2009.
- [21] R. Rigobello, J. M. Neto, e V. P. Silva, «Análise Numérica da Elevação de Temperatura em Secções Transversais de Elementos Estruturais em Situação de Incêndio», *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, vol. 5, n. 1, pp. 40–58, 2009.
- [22] E. M. M. Fonseca, «Thermal Analysis of Hollow Tubular Sections under High Temperatures», *Frontiers of Engineering Mechanics Research*, vol. 2, pp. 9–14, Jan. 2013.
- [23] M. M. S. Dwaikat e V. K. R. Kodur, «A Simplified Approach for Predicting Temperatures in Fire Exposed Steel Members», *Fire Safety Journal*, vol. 55, pp. 87–96, Jan. 2013.
- [24] L. Lausova, I. Skotnicova, e V. Michalcova, «Thermal Transient Analysis of Steel Hollow Sections Exposed to Fire», *Perspectives in Science*, vol. 7, pp. 247–252, Mar. 2016.
- [25] A. D. Ariyanayagam e M. Mahendran, «Fire Tests of Non-Load Bearing Light Gauge Steel Frame Walls Lined With Calcium Silicate Boards and Gypsum Plasterboards», *Thin-Walled Structures*, vol. 115, pp. 86–99, Jun. 2017.
- [26] M. B. Wong, «Temperature Analysis of Partially Heated Steel Members in Fire», *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 128, pp. 1–6, Jan. 2017.

- [27] P. A. G. Piloto, M. S. Khetata, e A. B. R. Gavilán, «Fire Performance of Non-Loadbearing Light Steel Framing Walls – Numerical and Simple Calculation Methods», *International Journal of Science and Technology*, vol. 3, n. 3, 2017.
- [28] M. Imran, M. S. Liew, M. S. Nasif, E. M. Gracia, K. U. Danyaro, e M. U. Niazi, «Thermal and Mechanical Response of Partially Protected Steel I-Beam under Fire», em *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 203, p. 6009.
- [29] W. Chen, J. Ye, e X. Li, «Thermal Behavior of Gypsum-Sheathed Cold-Formed Steel Composite Assemblies Under Fire Conditions», *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 149, pp. 165–179, Out. 2018.
- [30] B. Zhong, Y.-Q. Jiang, e G.-B. Lou, «Experimental Study on the Thermal and Structural Responses of a Full-Scale Steel Structure Under Natural Fire», em *Proceedings of the 10th International Conference on Structures in Fire*, 2018, vol. 60, pp. 975–980.
- [31] W. Chen, J. Ye, e Q. Zhao, «Thermal Performance of Non-Load-Bearing Cold-Formed Steel Walls Under Different Design Fire Conditions», *Thin-Walled Structures*, vol. 143, p. 106242, Out. 2019.
- [32] M. S. Khetata, P. A. G. Piloto, e A. B. R. Gavilán, «Non-Loadbearing Light Steel Framing Walls Under Fire», em *Proceedings of the 5th Iberian-Latin-American Congress on Fire safety*, 2019, pp. 169–187.
- [33] A. Correia, P. Lopes, J. P. Rodrigues, e J. Correia, «Proposta de Novas Expressões para o Cálculo do Fator de Massividade em Perfis Estruturais em Contacto com Paredes», em *Proceedings of the 5th Iberian-Latin-American Congress on Fire safety*, 2019, pp. 359–369.
- [34] EN 1993-1-2, *Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*. Bruxelas: CEN, European Committee for Standardization, 2010.
- [35] J. P. Soares, *Aços - Características e Tratamentos*, 6th ed. Publindústria, 2010.
- [36] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, e A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed. Michigan: Wiley, 2007.
- [37] M. J. Hurley *et al.*, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 5th ed. Nova York: Springer, 2015.
- [38] I. Rahmanian e Y. Wang, «Thermal Conductivity of Gypsum at High Temperatures – A Combined Experimental and Numerical Approach», *Acta Polytechnica*, vol. 49, n. 1, pp. 16–20, 2009.
- [39] D. J. Hopkin, T. Lennon, J. El-Rimawi, e V. V. Silberschmidt, «A Numerical Study of Gypsum Plasterboard Behaviour Under Standard and Natural Fire Conditions», *Fire and Materials*, vol. 36, n. 2, pp. 107–126, 2012.
- [40] «British Gypsum», 2019. [Em linha]. Disponível em: <https://www.british->

- gypsum.com/products/glasroc-f-firecase?tab0=0. [Acedido: 02-Dez-2019].
- [41] Ghonsla, *Technical Specifications of Laminated Gypsum Tiles*. Pakistan, 2015.
- [42] BS 520:2004+A1:2009, *Gypsum Plasterboards - Definitions, Requirements and Test Methods*. Inglaterra: British Standards, 2010.
- [43] S. H. Park, S. L. Manzello, D. P. Bentz, e T. Mizukami, «Determining Thermal Properties of Gypsum Board at Elevated Temperatures», *Fire and Materials*, vol. 34, n. 5, pp. 237–250, 2010.
- [44] A. Frangi, V. Schleifer, M. Fontana, e E. Hugi, «Experimental and Numerical Analysis of Gypsum Plasterboards in Fire», *Fire Technology*, vol. 46, n. 1, pp. 149–167, 2010.
- [45] A. O. Mydin, «Gypsum Board Thermal Properties Exposed to High Temperature and Fire Condition», *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iasi-Construction & Architecture Section*, vol. 62, n. 4, 2012.
- [46] S. L. Manzello, S. H. Park, T. Mizukamil, e D. Bentz, «Measurement of Thermal Properties of Gypsum Board at Elevated Temperatures», em *Proceedings of the 5th International Conference on Structures in Fire*, 2008.
- [47] ECCS (1995), «Fire Resistance of Steel Structures», em *ECCS Technical Note No. 89*, Bruxelas, Belgica: European Commission for Constructional Steelwork, 1995.
- [48] Knauf, «Preço em Portugal de metro de Protecção passiva contra incêndios de estrutura metálica, com placas de gesso laminado». [Em linha]. Disponível em: http://knauf.geradordeprecos.info/obra_nova/Instalacoes/Contra_incendios/Proteccao_passiva_contra_incendios_IOJ021_Proteccao_passiva_contra_incendios_.html. [Acedido: 09-Abr-2020].
- [49] J. P. Holman, *Heat Transfer*, 10th ed. Nova York: McGraw Hill, 2010.
- [50] J. H. Lienhard IV e J. H. Lienhard V, *A Heat Transfer Textbook*, 3rd ed. Massachusetts: Courier Dover Publications, 2019.
- [51] J. B. J. Fourier, *Théorie Analytique de la Chaleur*. Paris: Firmin Didot, 1822.
- [52] D. Drysdale, *An Introduction to Fire Dynamics*, 3rd ed. Edimburgo: John Wiley & Sons, 2011.
- [53] B. Karlsson e J. Quintiere, *Enclosure Fire Dynamics*, 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 1999.
- [54] EN 1991-1-2, *Eurocode 1: Actions on Structures - Part 1-2: Structural Fire Design*. Bruxelas: CEN, European Committee for Standardization, 2010.
- [55] R. H. Dias, «Importância e interferências da concepção dos subsistemas verticais em edifícios altos na arquitetura», 2004. [Em linha]. Disponível em: <https://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/05.055/520>. [Acedido: 18-Dez-2019].

- [56] T. Taveira, «Creative University - IADE», 2011. [Em linha]. Disponível em: <http://www.tomastaveira.com/pt/creative-university---creative-universite---iade>. [Acedido: 17-Dez-2019].
- [57] J.-M. Franssen e P. Vila Real, *Fire Design of Steel Structures: EC1: Actions on structures; Part 1-2: Actions on structure exposed to fire; EC3: Design of steel structures; Part 1-2: Structural fire design, Partes 1-2*, 2nd ed. Berlim: John Wiley & Sons, 2016.
- [58] ISO 834-1, *Fire Resistance Tests - Elements of building Construction*. Genebra: International Organization for Standardization, 1999.
- [59] B. Little, B. C. Howard, e B. Handwerk, «Remembering 9/11 in Pictures», 2018. [Em linha]. Disponível em: <https://www.nationalgeographic.com/news/2016/09/september-11-pictures-remembrance/>. [Acedido: 11-Abr-2020].
- [60] E. M. M. Fonseca e P. Vila Real, «Finite Element Modelling of Thermo-Elastoplastic Behaviour of Hot-Rolled Steel Profiles Submitted to Fire», *IV Congresso de Métodos Numéricos en Ingeniería*, 1999.
- [61] E. M. M. Fonseca e C. A. M. de Oliveira, «Métodos Avançados de Cálculo de Estruturas Metálicas Submetidas à Acção do Fogo», *Revista Internacional Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, vol. 18, n. 3, pp. 367–384, 2002.
- [62] ACELOR Sections Commercial S.A, «Beams, Channels and Merchant Bars Catalog».
- [63] L. Twilt, P. H. E. Leur, e C. Both, «Characteristics of the Heat Transfer for Calculating the Temperature Development in Structural Steelwork Exposed to Standard Fire Conditions Under Plate Thermocouple Control», em *Proceedings of the 1st International Workshop "Structures in Fire"*, 2001.
- [64] E. M. M. Fonseca, D. Ferreira, e L. Barreira, «Profiles Submitted to Fire: Lumped Capacitance Method Versus Computational Model», *Revista da Associação Portuguesa de Análises Experimental de Tensões*, vol. 27, pp. 1–5, 2014.
- [65] S. Baglio, S. Castorina, L. Fortuna, e N. Savalli, «Modeling and Design of Novel Photo-Thermo-Mechanical Microactuators», *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 101, n. 1–2, pp. 185–193, Set. 2002.
- [66] B. Xu, P. W. Li, e C. L. Chan, «Extending the Validity of Lumped Capacitance Method for Large Biot Number in Thermal Storage Application», *Solar Energy*, vol. 86, n. 6, pp. 1709–1724, Jun. 2012.
- [67] D. K. Banerjee, «Uncertainties in steel temperatures during fire», *Fire Safety Journal*, vol. 61, pp. 65–71, 2013.
- [68] P. Košťál *et al.*, «Lumped Capacitance Model in Thermal Analysis of Solid

- Materials», *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 588, p. 12006, Fev. 2015.
- [69] R. D. S. G. Campilho, *Método de Elementos Finitos: Ferramentas para Análise Estrutural*. Porto: Publindústria, 2012.
- [70] J.-M. Franssen, «SAFIR: A Thermal/Structural Program for Modeling Structures Under Fire», *Engineering Journal-American Institute of Steel Construction Inc*, vol. 42, n. 3, pp. 143–158, 2005.
- [71] P. Vila Real, «Modelação por Elementos Finitos do Comportamento Térmico e Termo-Elástico de Sólidos Sujeitos a Elevados Gradientes Térmicos», Dissertação apresentada para obtenção do grau de doutor em Engenharia Mecânica à Faculdade de Engenharia do Porto, 1988.
- [72] P. Vila Real, «Modelação por Elementos Finitos da Solidificação e Comportamento Termomecânico de Peças Vazas em Moldações Metálicas», Dissertação apresentada para obtenção do grau de mestre em Engenharia Estrutural à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1993.
- [73] E. M. M. Fonseca, «Análise por Elementos Finitos do Comportamento de Tubagens sob a Ação de Fortes Gradientes Térmicos», Dissertação apresentada para obtenção do grau de doutor em Engenharia Mecânica à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- [74] E. M. M. Fonseca, «Modelação Numérica do Comportamento Termo-Mecânico de Componentes Metálicos Sujeitos ao Fogo», Dissertação apresentada para obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1998.
- [75] E. M. M. Fonseca e C. Magalhães, «Advanced Calculation Methods for Metallic Structures Submitted to Fire Action», *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, vol. 18, n. 3, pp. 367–384, Jan. 2002.
- [76] P. A. G. Piloto, «Utilização de Métodos Avançados de Cálculo na Avaliação do Comportamento Termomecânico de Estruturas Metálicas em Situação de Incêndio», em *Proceedings of the 3º Congresso Luso Moçambicano de Engenharia*, 2003.
- [77] O. C. Zienkiewicz e R. L. Taylor, *The Finite Element Method - Solid and Fluid Mechanics, Dynamics and Non-Linearity*, 4th ed. Michigan: McGraw-Hill, 1989.
- [78] D. V. Hutton, *Fundamentals of Finite Element Analysis*, 1st ed. Nova York: McGraw-Hill, 2004.
- [79] S. S. Rao, *The Finite Element Method in Engineering*, 5th ed. Butterworth-Heinemann, 2010.
- [80] E. Madenci e I. Guven, *The Finite Element Method and Applications in Engineering using ANSYS®*, 2nd ed. Springer, 2015.

-
- [81] G. N. S. Costa, «Análise Térmica de Lajes em Madeira Com e Sem Proteção», Dissertação apresentada para obtenção do grau de mestre em Engenharia Industrial à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Politécnico de Bragança, 2017.
- [82] Ansys, *ANSYS Theory Reference: Release 5.6*. ANSYS Incorporated, 1999.
- [83] ENV 1993-1-2, *Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*. Bruxelas: CEN, European Committee for Standardization, 2001.
- [84] P. Keerthan e M. Mahendran, «Thermal Performance of Composite Panels Under Fire Conditions Using Numerical Studies: Plasterboards, Rockwool, Glass Fibre and Cellulose Insulations», *Fire Technology*, vol. 49, n. 2, pp. 329–356, 2013.
- [85] T. Li *et al.*, «Anisotropic, Lightweight, Strong, and Super Thermally Insulating Nanowood with Naturally Aligned Nanocellulose», *Science Advances*, vol. 4, n. 3, Mar. 2018.

ANEXOS

10 ANEXOS

10.1 ANEXO 1

No Anexo 1, são apresentados os valores calculados de fator de massividade e comprimento característico para os perfis estudados.

Tabela 10.1 - Valores de fator de massividade e comprimento característico dos perfis IPE

Perfil	Fator de massividade [m^{-1}]	Comprimento característico [m]
IPE 100	387,38	0,0026
IPE 120	351,08	0,0028
IPE 140	327,07	0,0031
IPE 160	302,71	0,0033
IPE 180	284,61	0,0035
IPE 200	263,62	0,0038
IPE 220	248,07	0,0040
IPE 240	230,12	0,0043
IPE 270	221,86	0,0045
IPE 300	211,55	0,0047
IPE 330	196,47	0,0051
IPE 360	182,17	0,0054
IPE 400	170,18	0,0059
IPE 450	159,27	0,0063
IPE 500	150,95	0,0066
IPE 550	139,63	0,0072
IPE 600	129,15	0,0077

Tabela 10.2 - Valores de fator de massividade e comprimento característico dos perfis HEM

Perfil	Fator de massividade [m^{-1}]	Comprimento característico [m]
HEM 100	116,34	0,0086
HEM 120	111,19	0,0089
HEM 140	106,68	0,0093
HEM 160	99,97	0,0100
HEM 180	96,14	0,0104
HEM 200	91,63	0,0109
HEM 220	88,49	0,0113
HEM 240	73,14	0,0137
HEM 260	71,71	0,0139
HEM 280	70,51	0,0142
HEM 300	63,99	0,0156
HEM 320	59,79	0,0167
HEM 340	60,22	0,1661
HEM 360	60,65	0,0165
HEM 400	61,49	0,0162
HEM 450	62,48	0,0160
HEM 500	63,42	0,0158
HEM 550	64,32	0,0155
HEM 600	65,21	0,0153
HEM 650	66,03	0,0151
HEM 700	66,83	0,0149
HEM 800	67,93	0,0147
HEM 900	69,27	0,0144
HEM 1000	70,48	0,0141

Tabela 10.3 - Valores de fator de massividade e comprimento característico dos perfis L

Perfil	Fator de massividade [m^{-1}]	Comprimento característico [m]
L 100x100x8	255,49	0,0039
L 110x110x10	207,09	0,0048
L 120x120x10	206,48	0,0048
L 130x130x12	173,66	0,0057
L 140x140x10	203,81	0,0049
L 150x150x10	202,85	0,0049
L 160x160x14	148,33	0,0067
L 180x180x15	138,59	0,0072
L 200x200x20	106,14	0,0094
L 250x250x25	85,67	0,0167

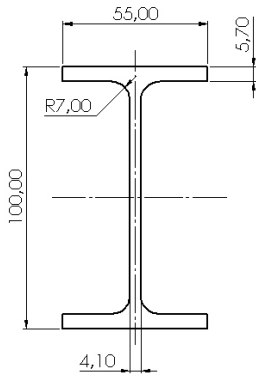
Tabela 10.4 - Valores de fator de massividade e comprimento característico dos perfis UAP

Perfil	Fator de massividade [m^{-1}]	Comprimento característico [m]
UAP 80	302,84	0,0033
UAP 100	285,28	0,0035
UAP 130	262,77	0,0038
UAP 150	235,20	0,0042
UAP 175	223,86	0,0045
UAP 200	210,80	0,0047
UAP 220	202,17	0,0049
UAP 250	185,02	0,0054
UAP 300	165,17	0,0060

10.2 ANEXO 2

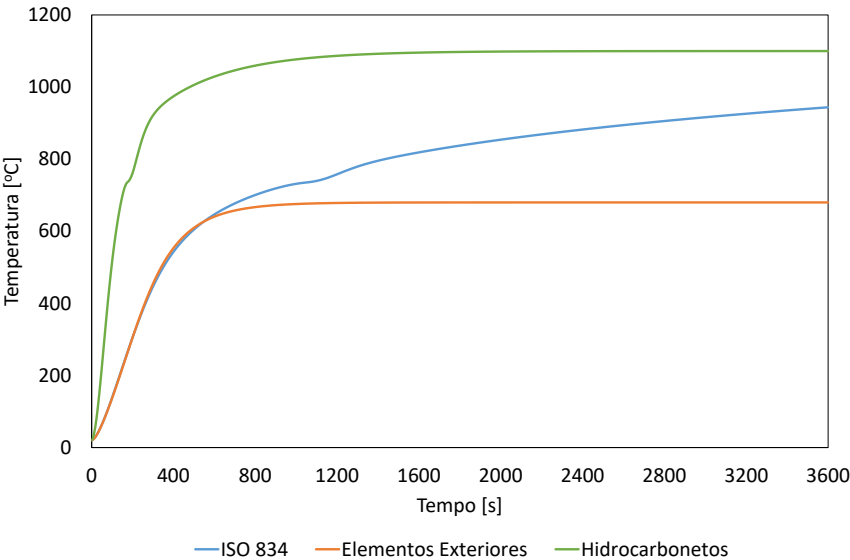
Neste anexo são apresentadas fichas técnicas de resistência ao fogo dos perfis em aço estudados. Estas possuem todos os resultados obtidos ao longo deste trabalho.

IPE 100

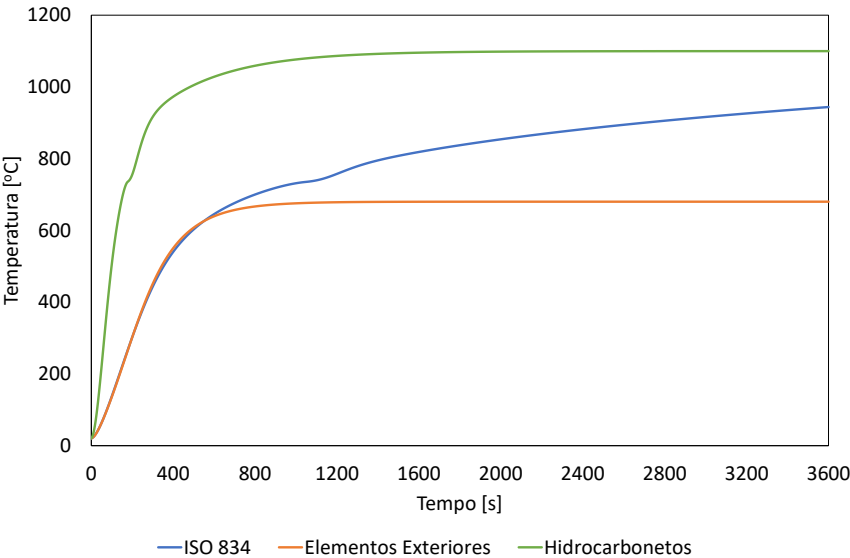


Perímetro [m]	0,3998
Área [m²]	0,001032
Fator de massividade [m ⁻¹]	387,38
Comprimento Característico [m]	0,0026

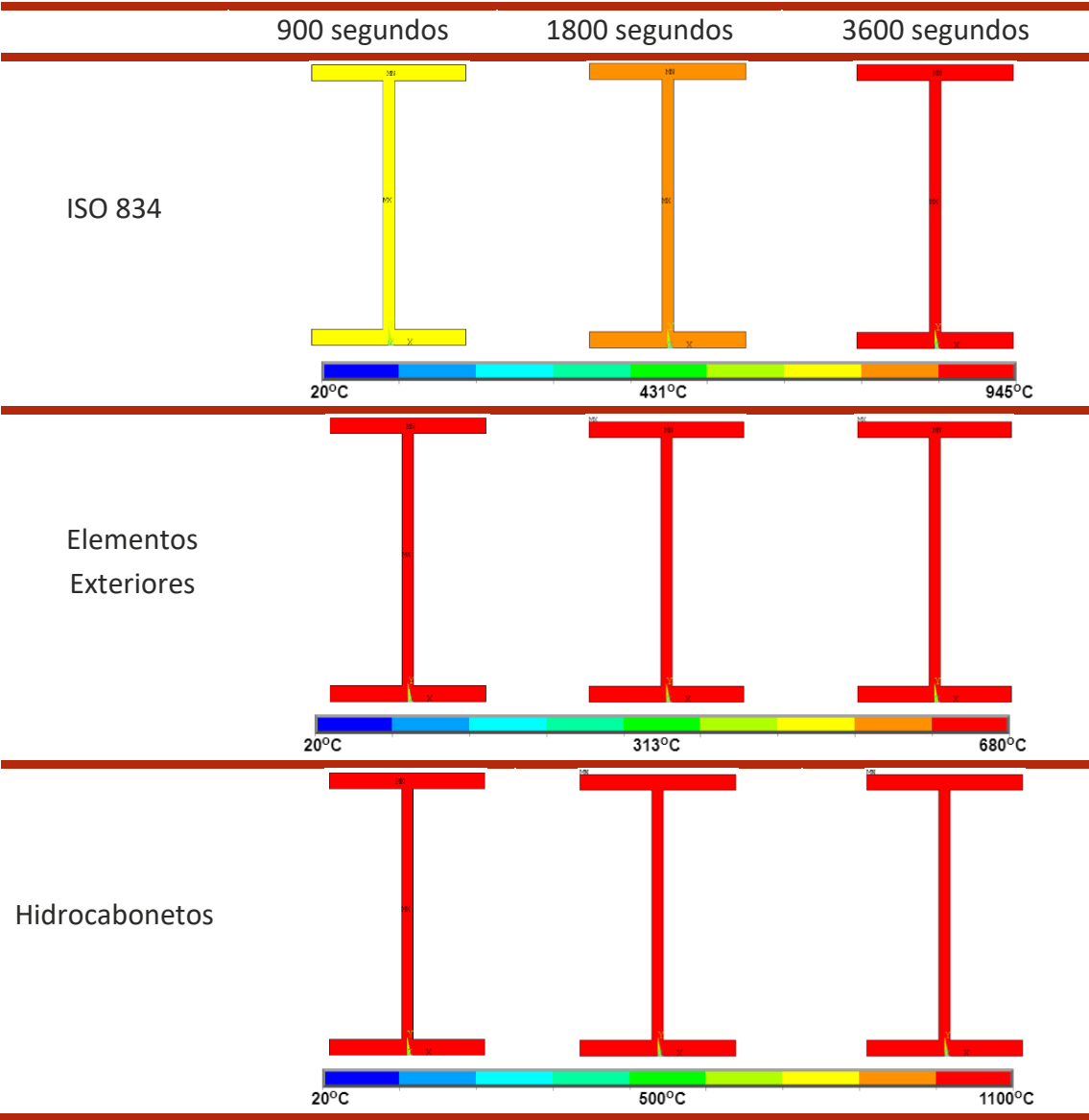
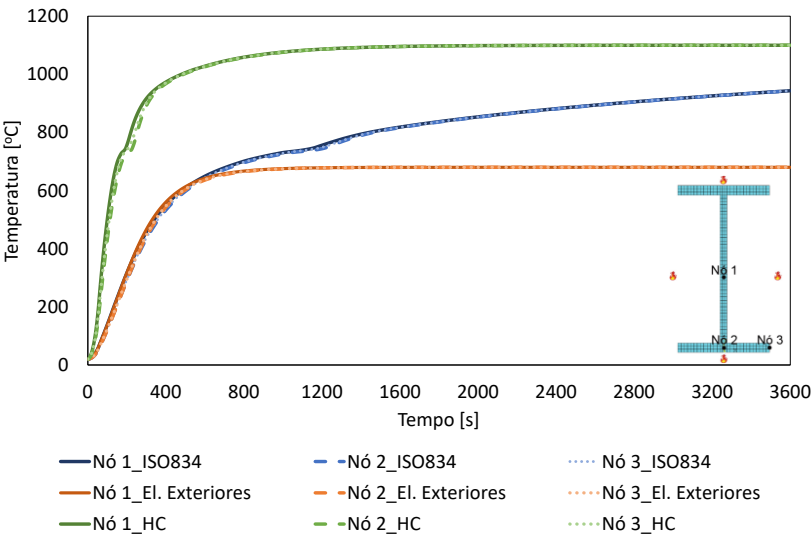
Método Simplificado do Eurocódigo 3



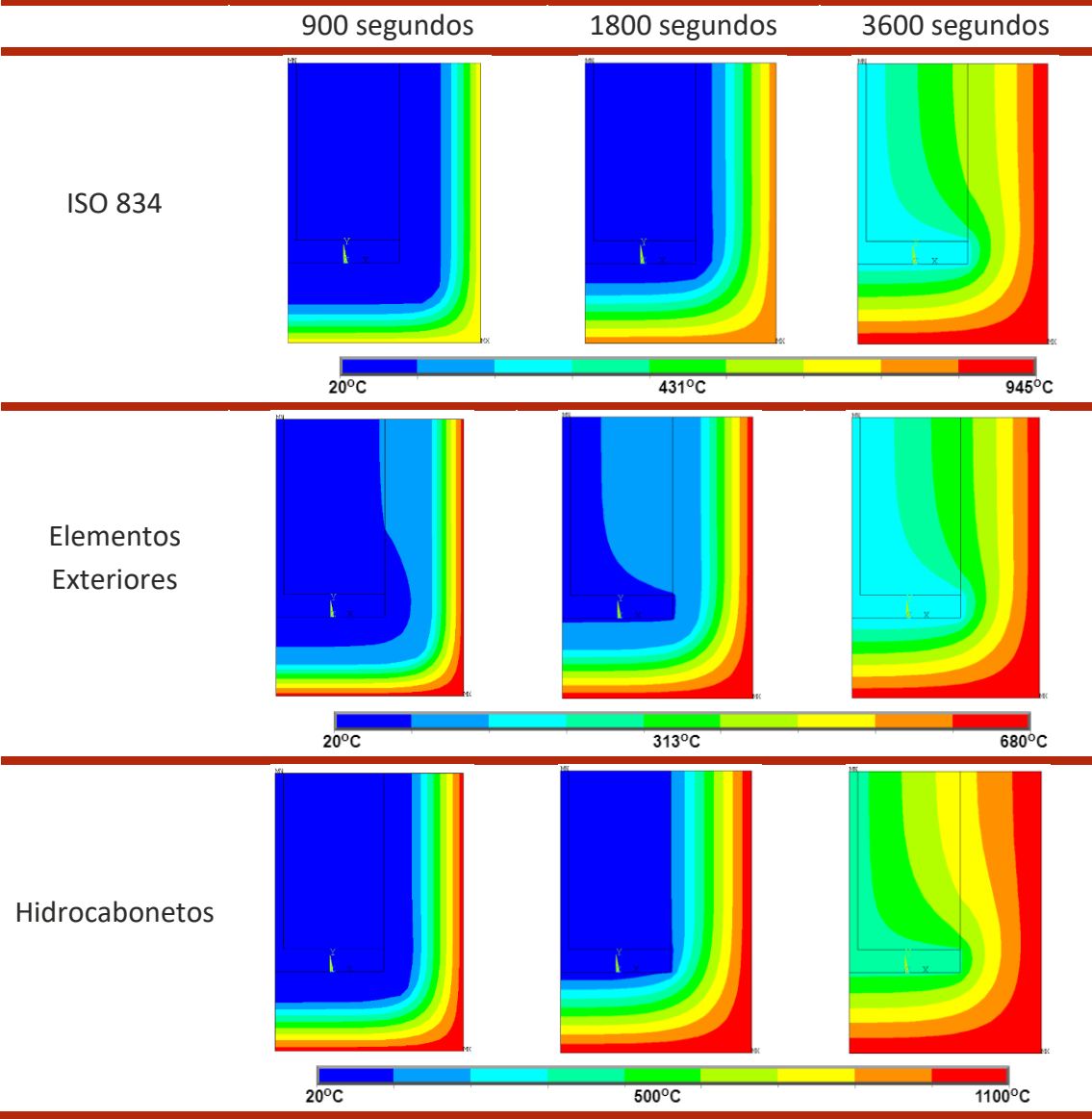
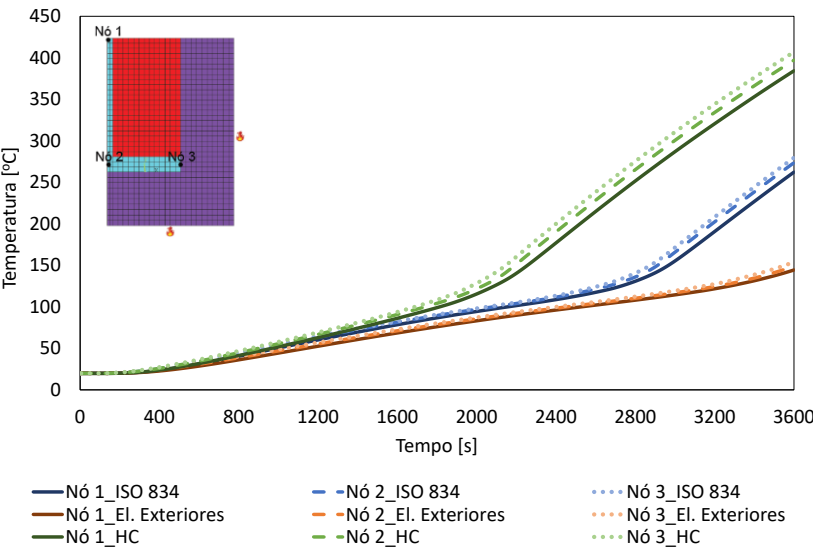
Método da Capacitância Global



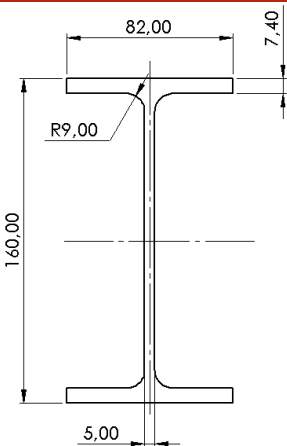
Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

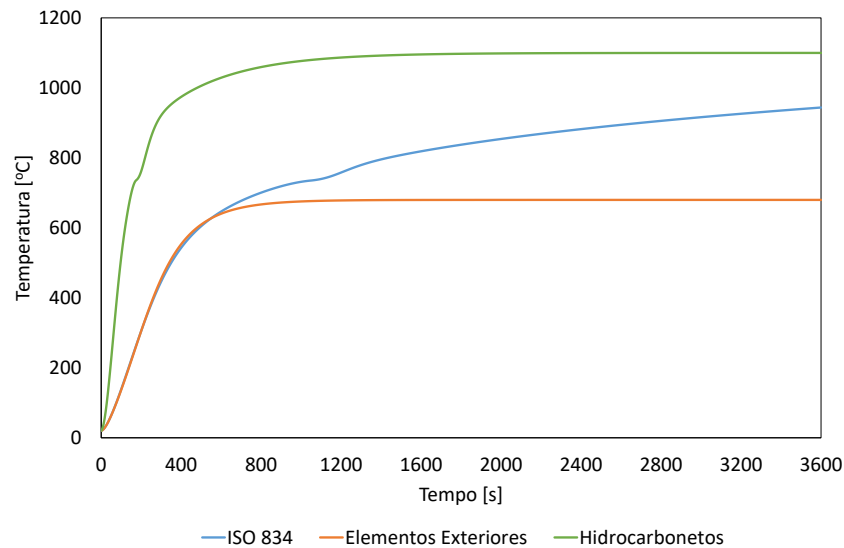


IPE 160

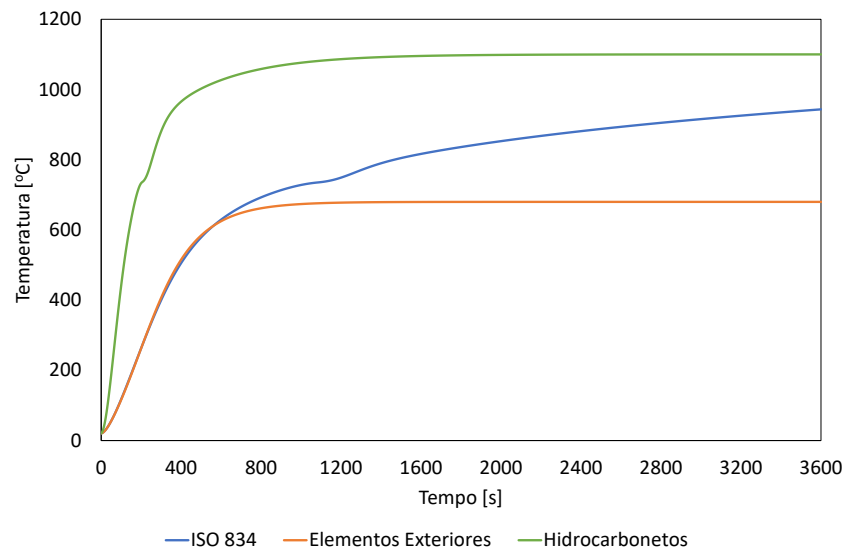


Perímetro [m]	0,6229
Área [m²]	0,002009
Fator de massividade [m ⁻¹]	310,079
Comprimento Característico [m]	0,0032

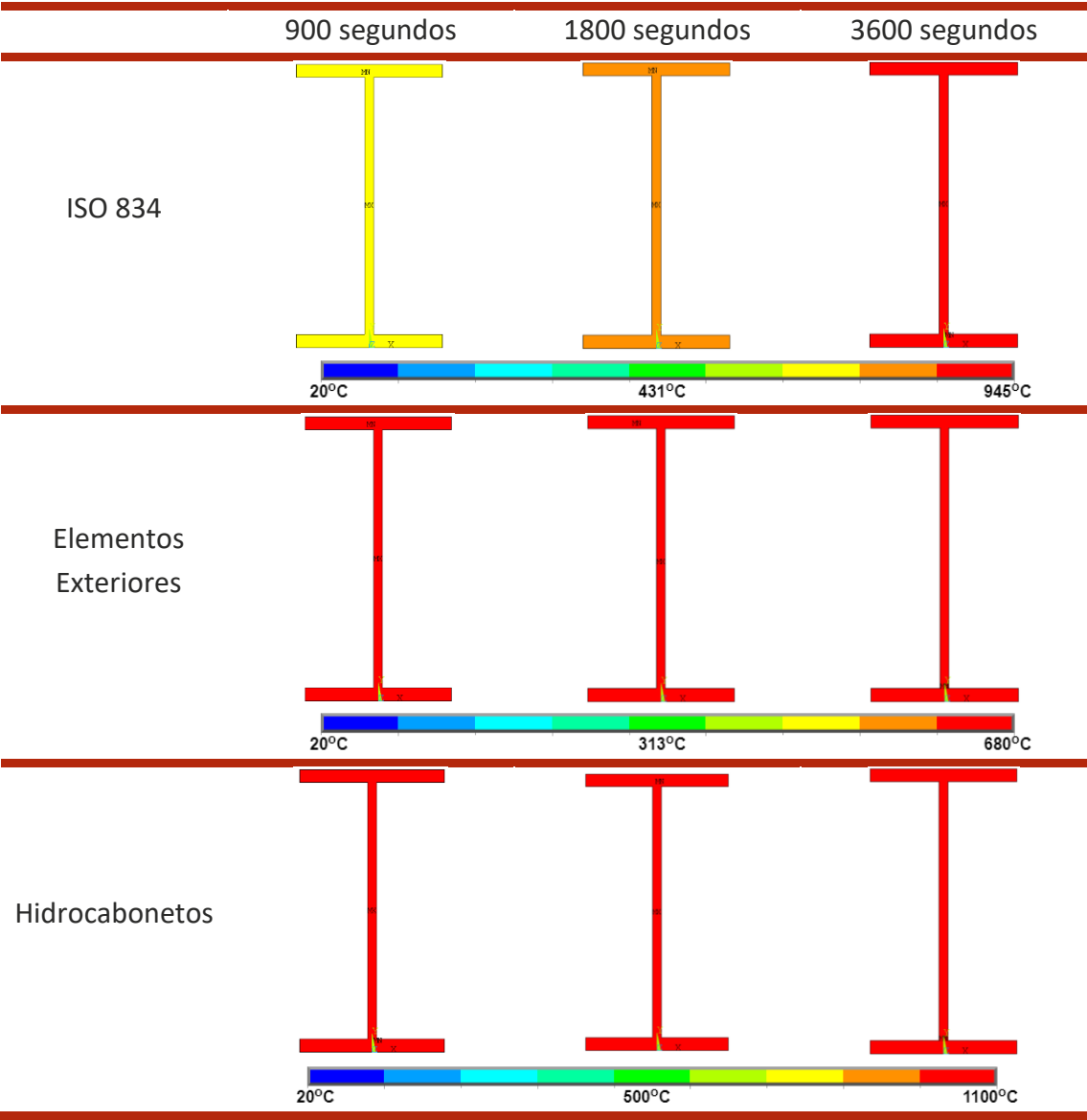
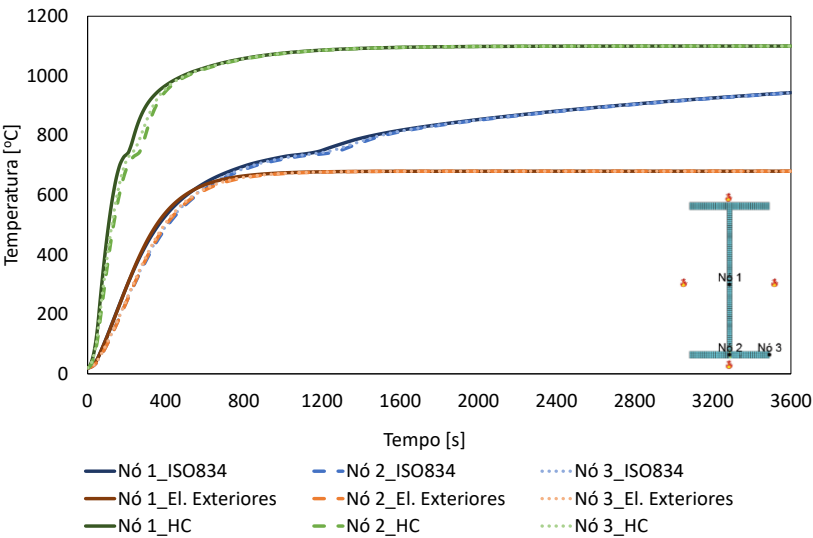
Método Simplificado do Eurocódigo 3



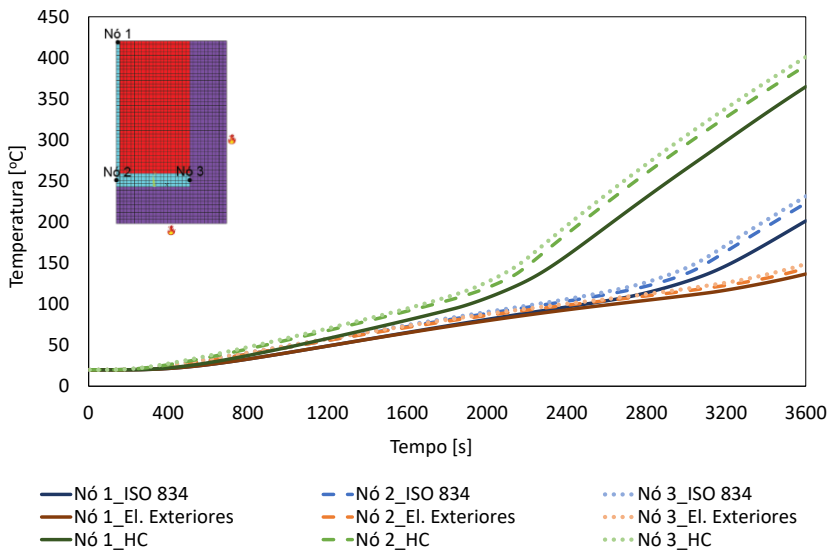
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

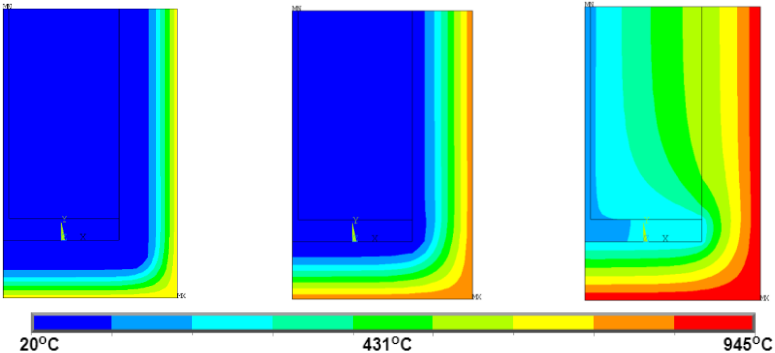


900 segundos

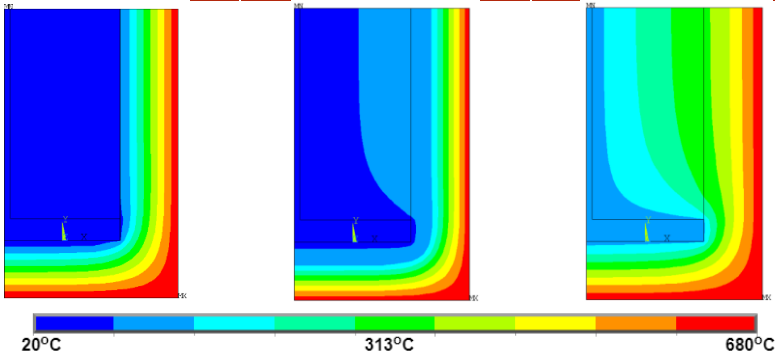
1800 segundos

3600 segundos

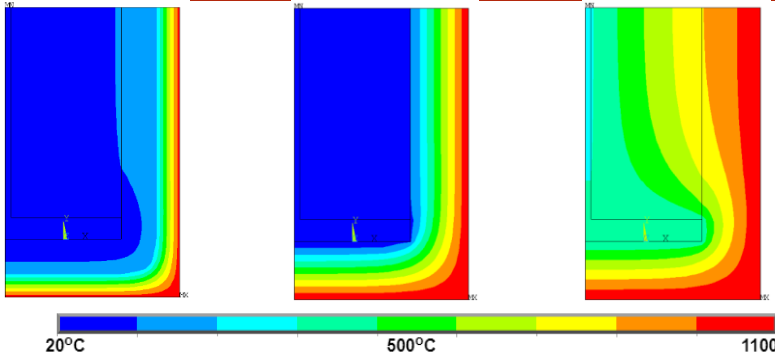
ISO 834



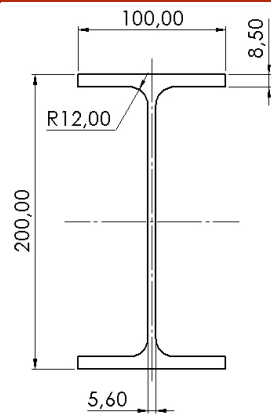
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

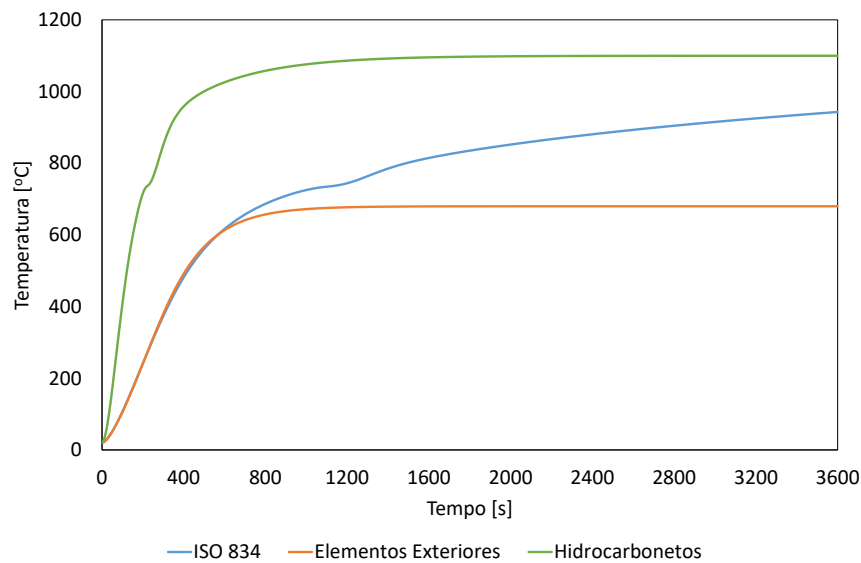


IPE 200

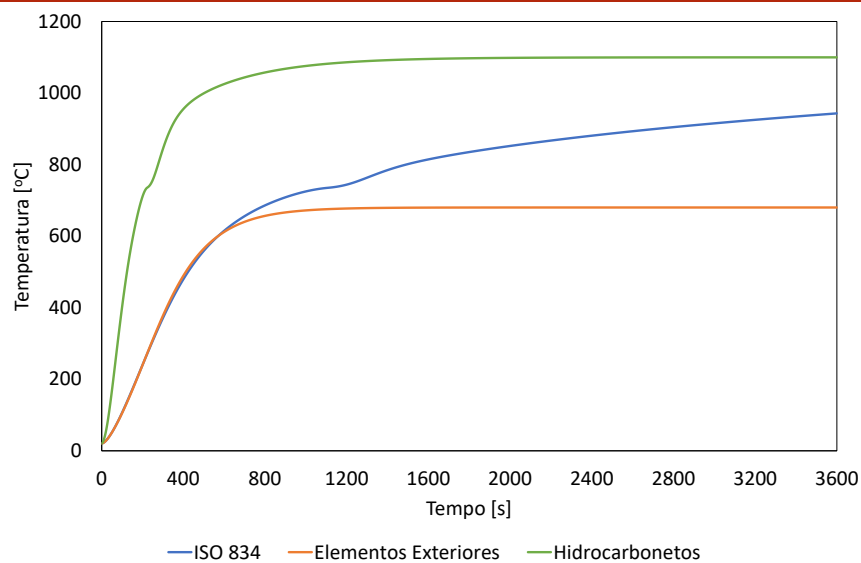


Perímetro [m]	0,7682
Área [m ²]	0,002848
Fator de massividade [m ⁻¹]	269,73
Comprimento Característico [m]	0,0037

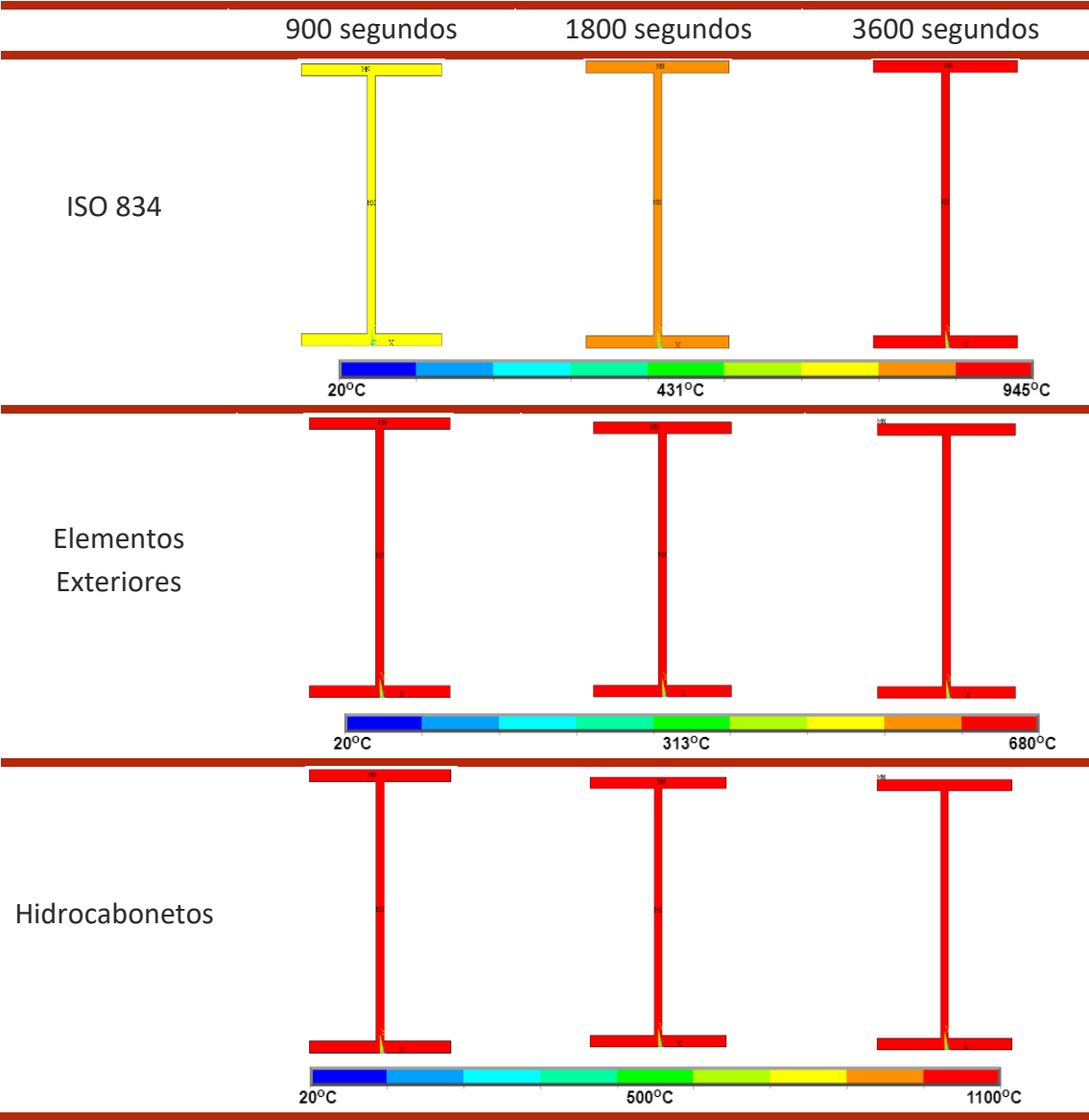
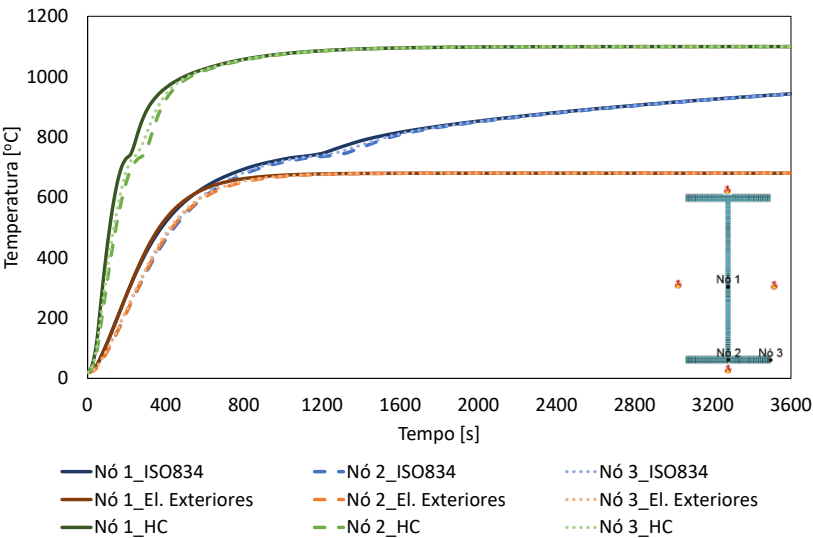
Método Simplificado do Eurocódigo 3



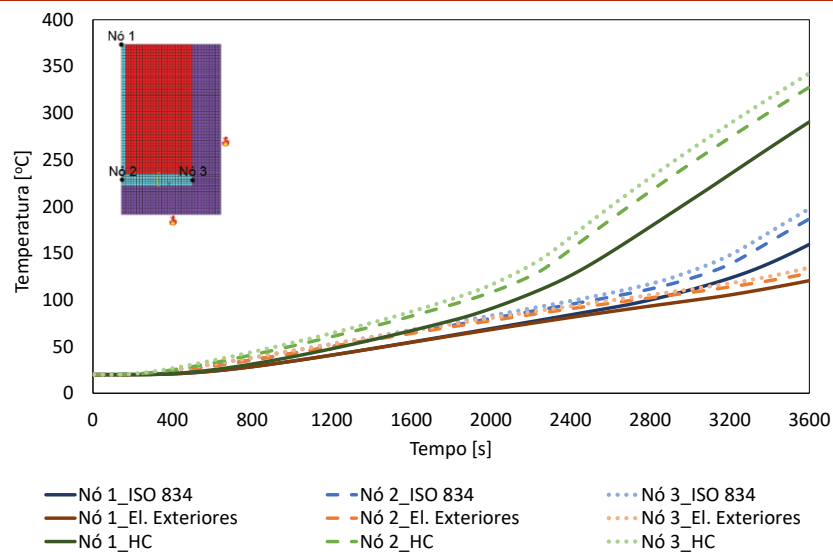
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

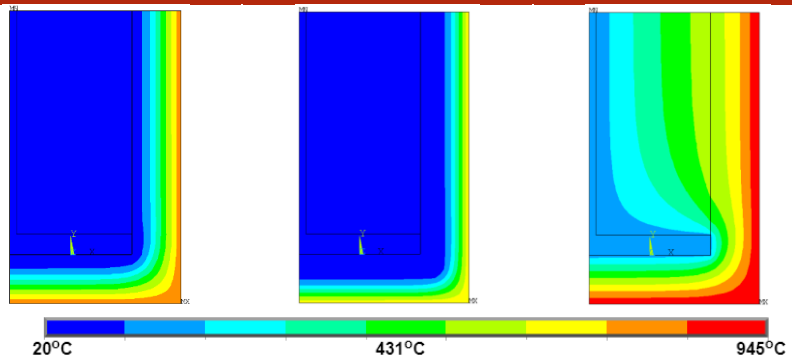
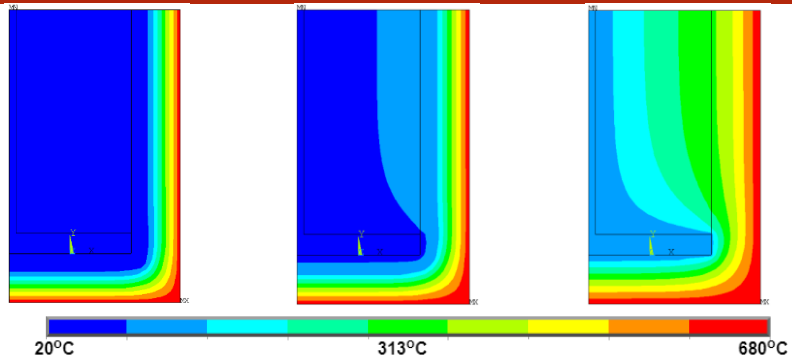


900 segundos

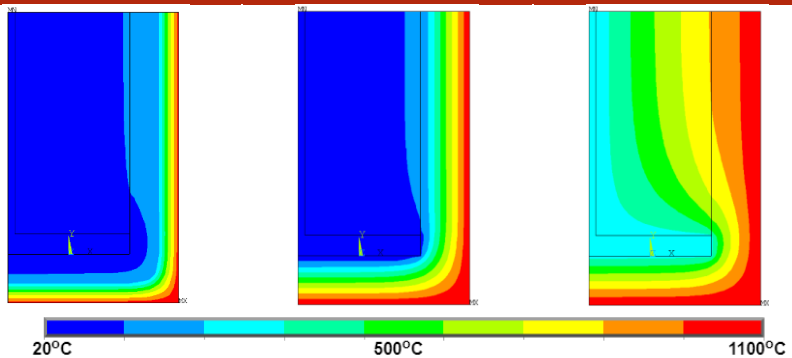
1800 segundos

3600 segundos

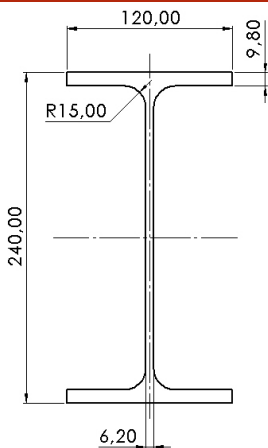
ISO 834

Elementos
Exteriores

Hidrocarbonetos

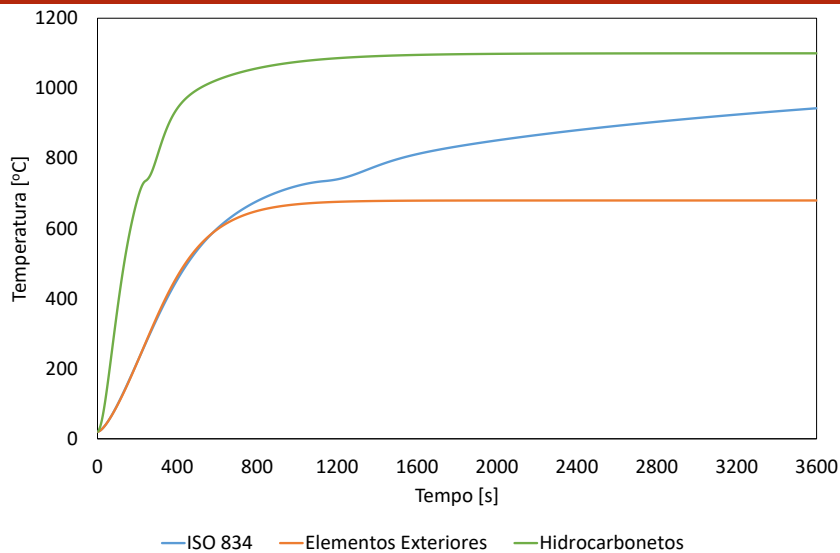


IPE 240

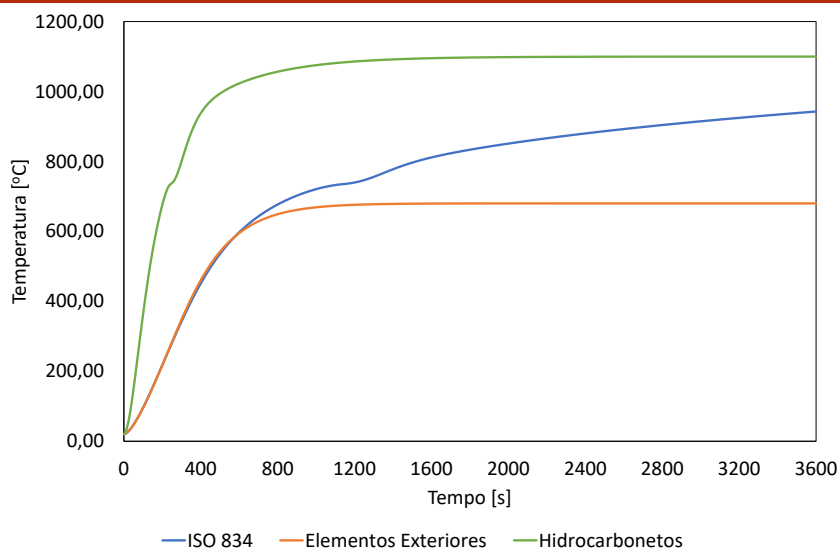


Perímetro [m]	0,9218
Área [m²]	0,003912
Fator de massividade [m ⁻¹]	235,65
Comprimento Característico [m]	0,0042

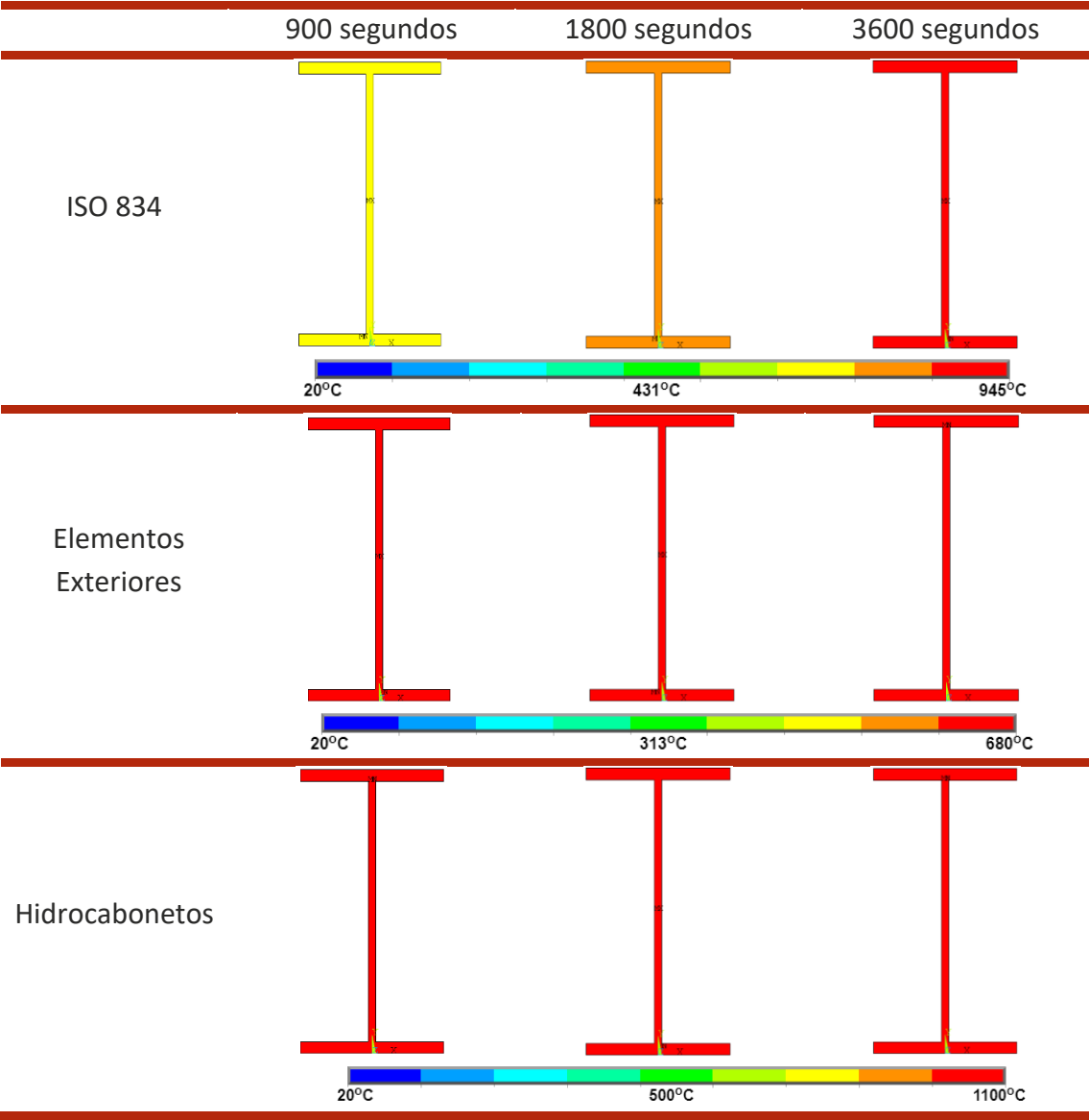
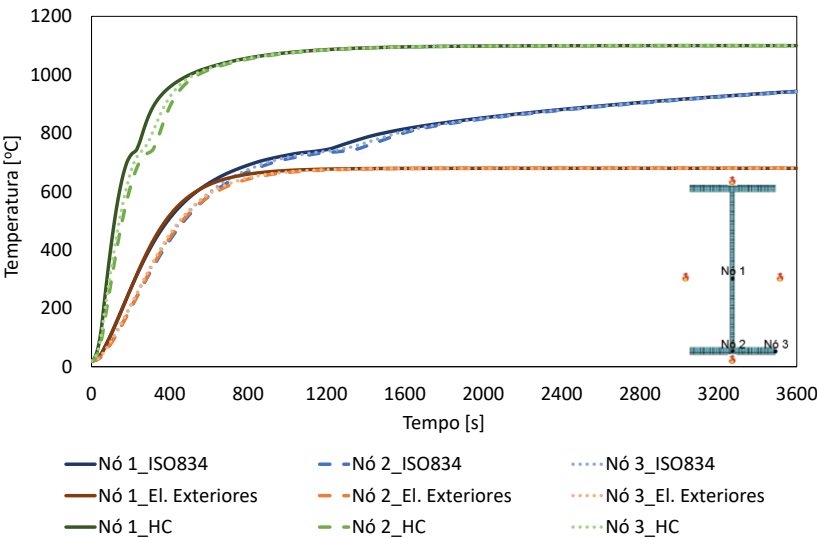
Método Simplificado do Eurocódigo 3



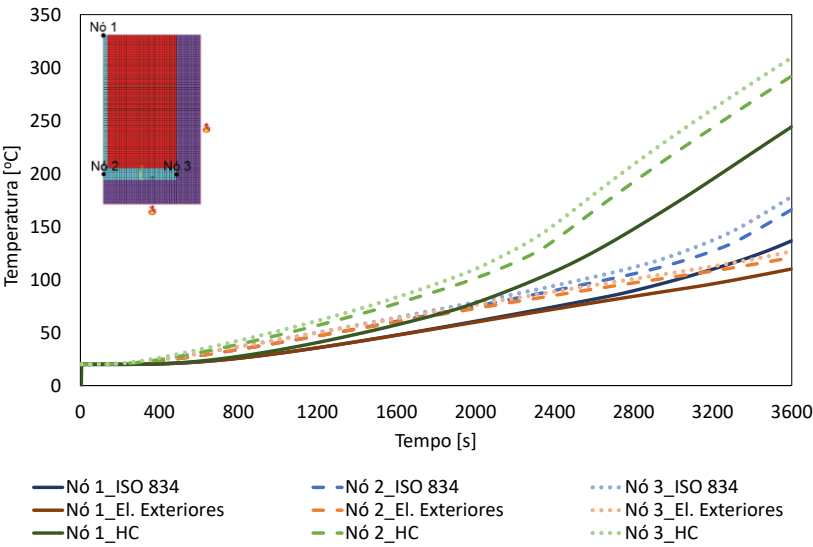
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)

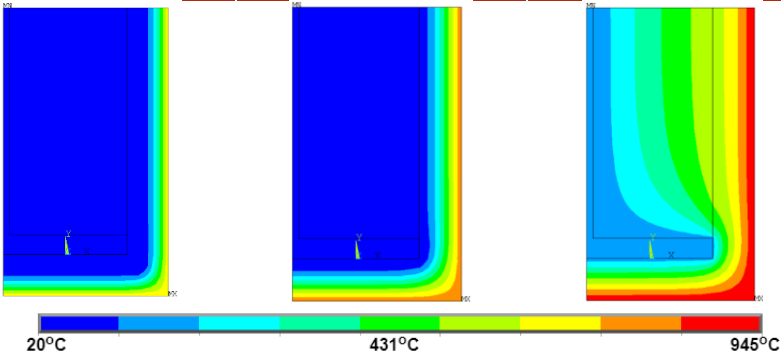


Método Numérico (Perfil Protegido)

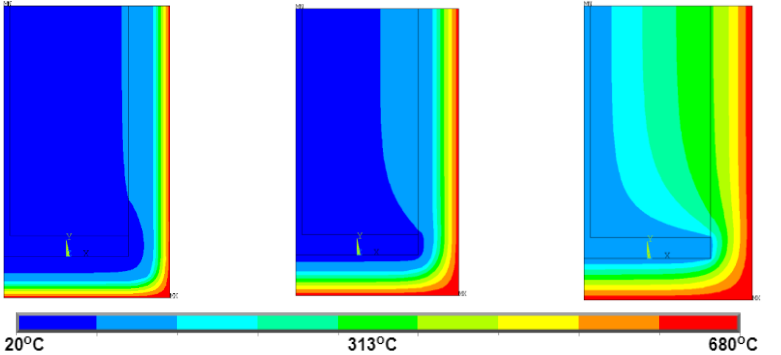


900 segundos 1800 segundos 3600 segundos

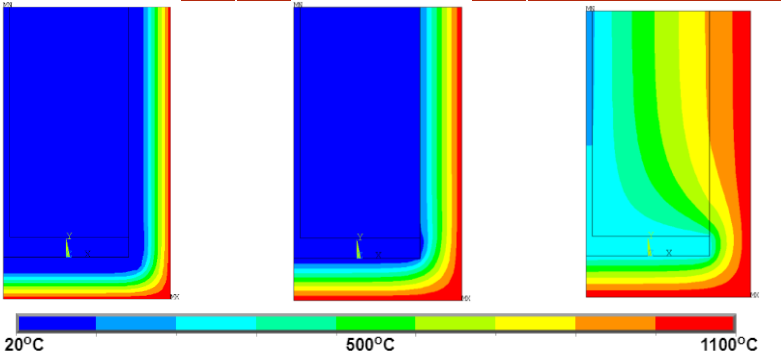
ISO 834



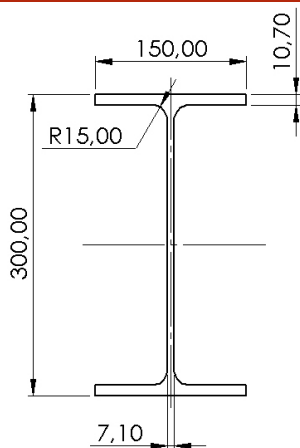
Elementos Exteriores



Hidrocabonetos

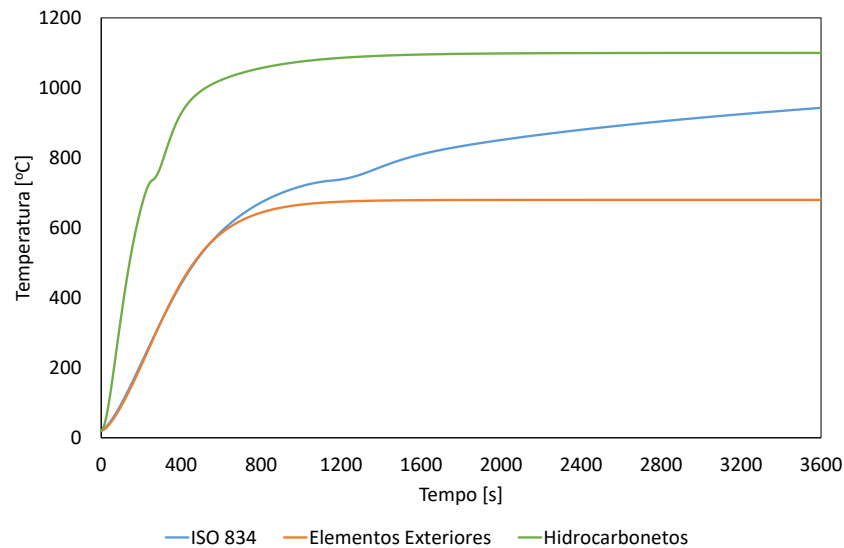


IPE 300

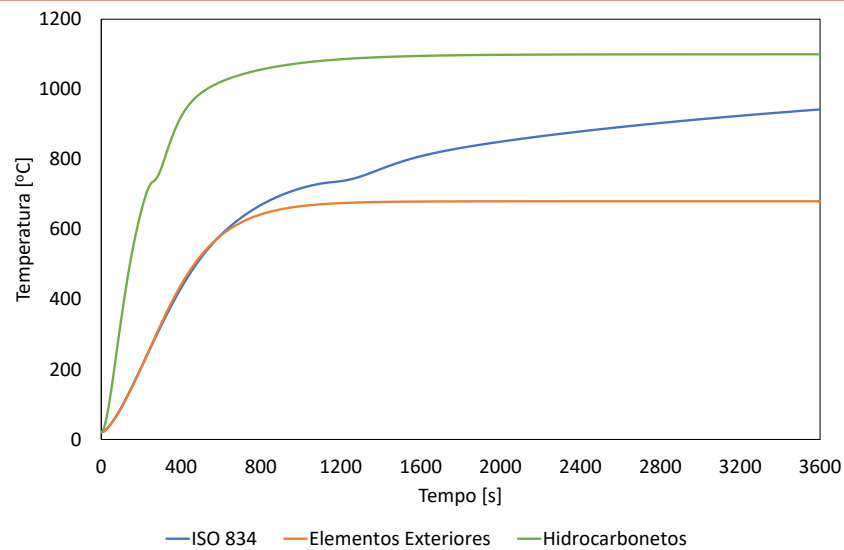


Perímetro [m]	1,1601
Área [m²]	0,005381
Fator de massividade [m ⁻¹]	215,28
Comprimento Característico [m]	0,0046

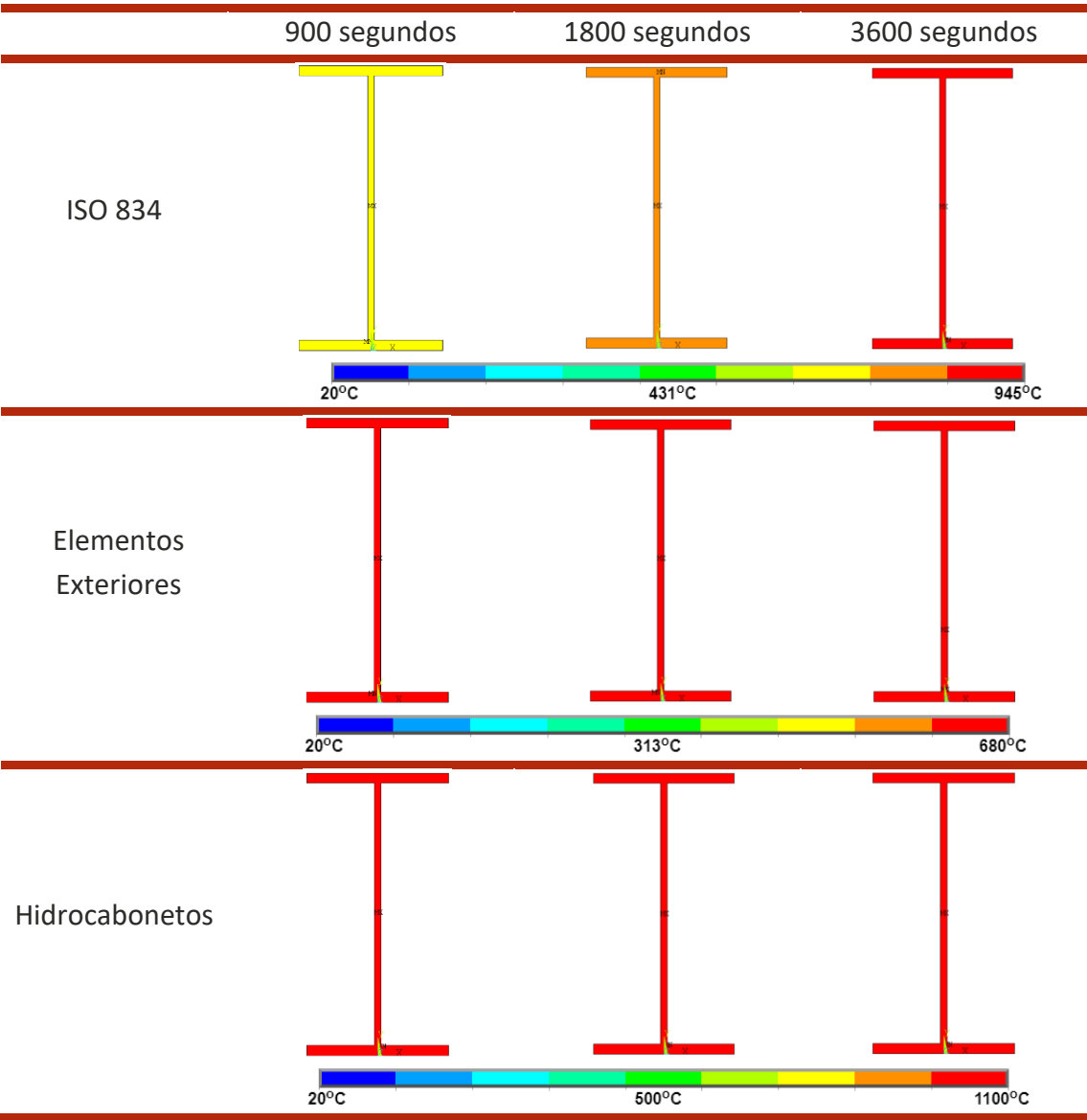
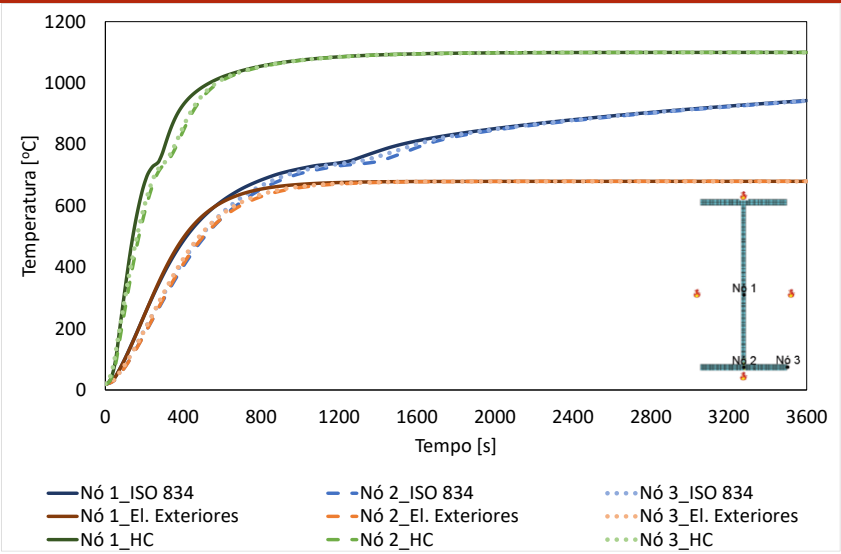
Método Simplificado do Eurocódigo 3



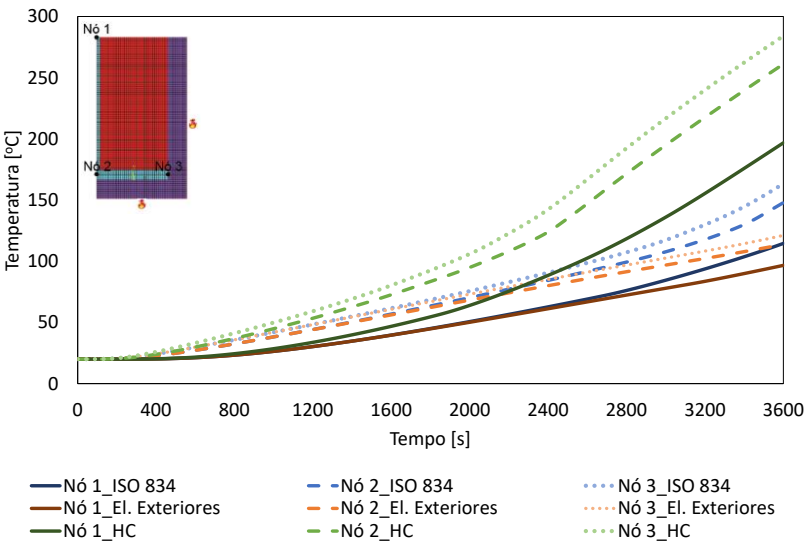
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)

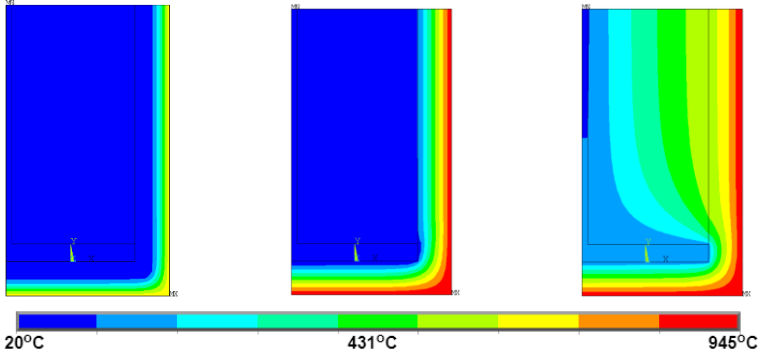


Método Numérico (Perfil Protegido)

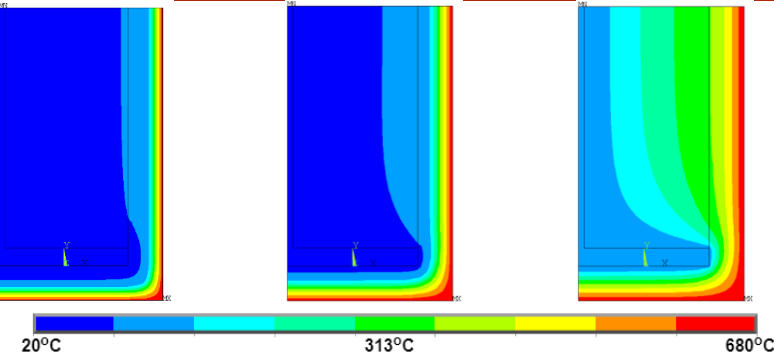


00 segundos 1800 segundos 3600 segundos

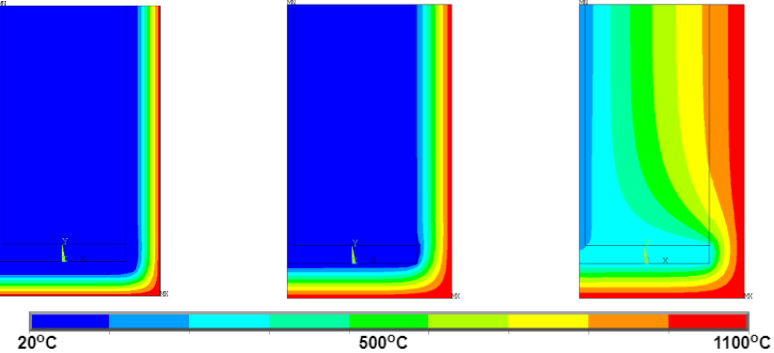
ISO 834



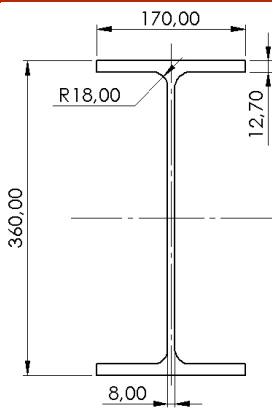
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

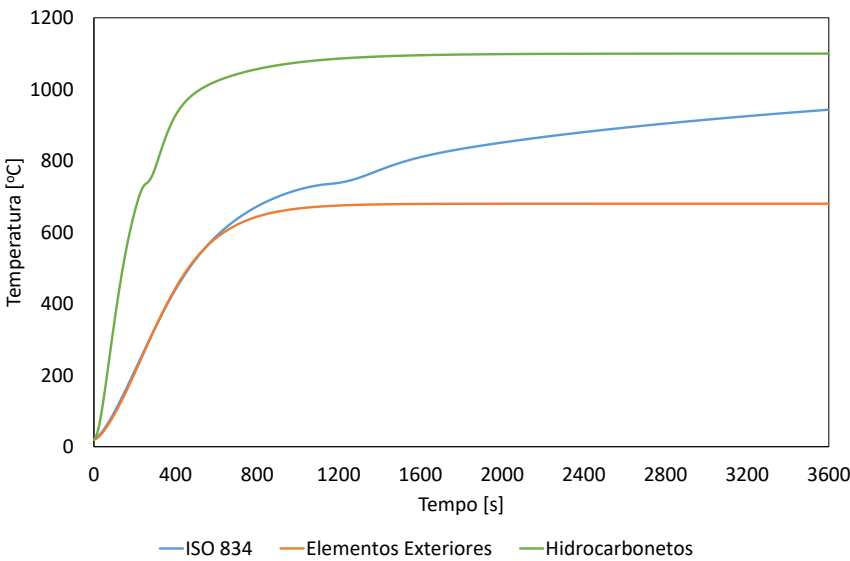


IPE 360

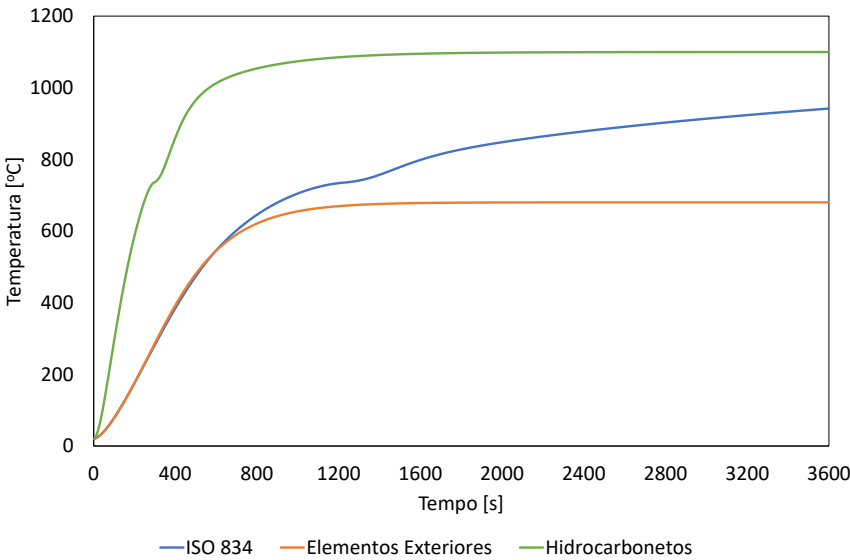


Perímetro [m]	1,3531
Área [m ²]	0,007273
Fator de massividade [m ⁻¹]	186,04
Comprimento Característico [m]	0,0054

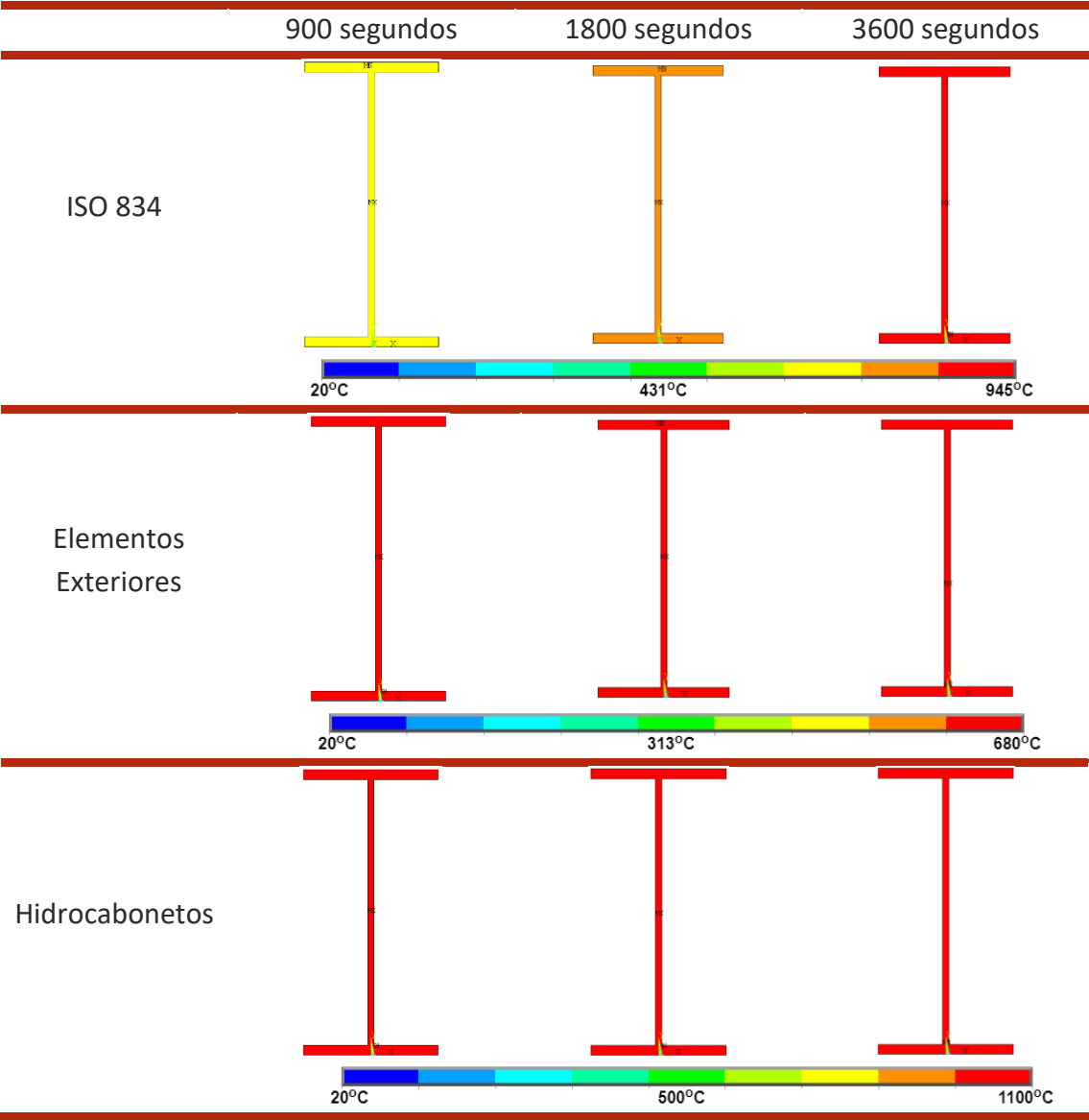
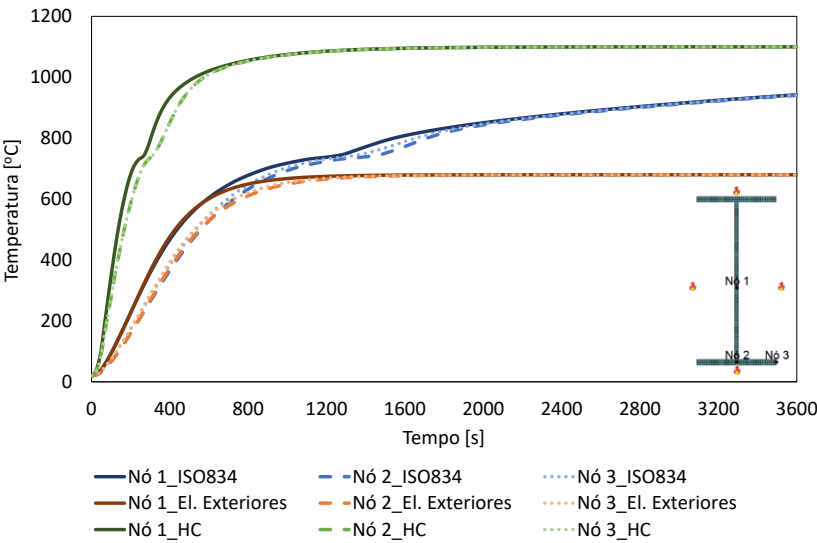
Método Simplificado do Eurocódigo 3



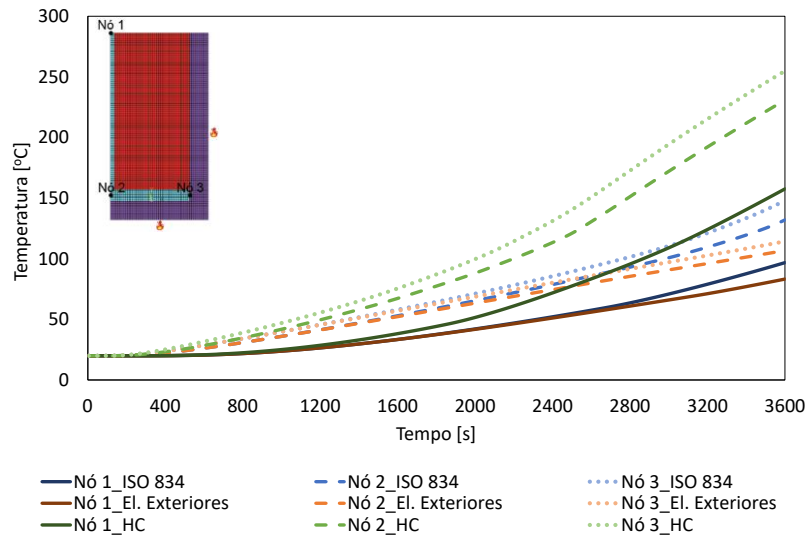
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)

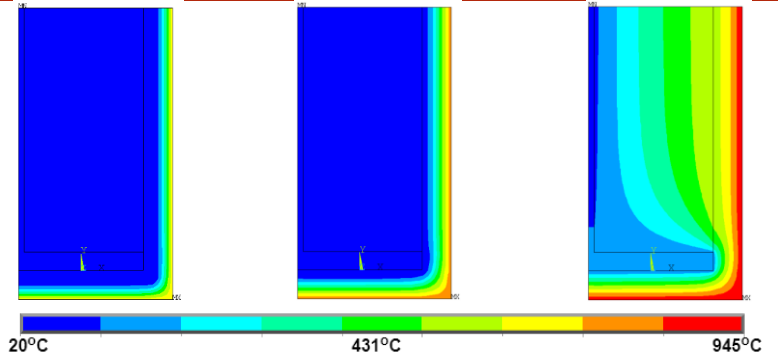


Método Numérico (Perfil Protegido)

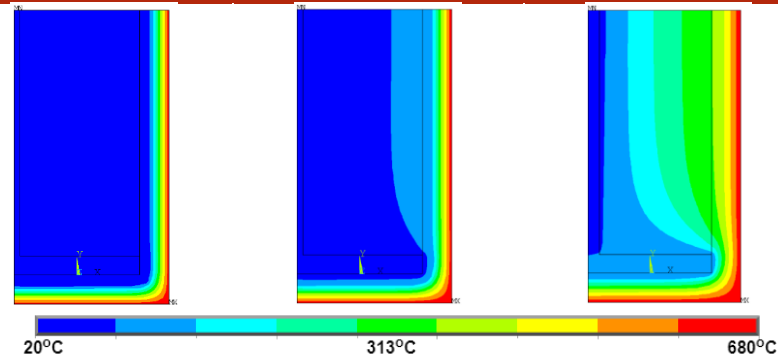


900 segundos 1800 segundos 3600 segundos

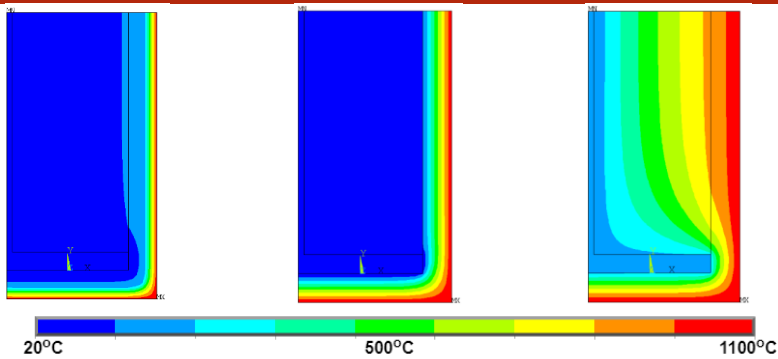
ISO 834



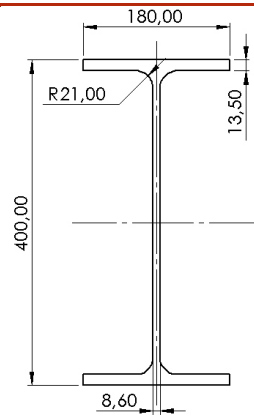
Elementos Exteriores



Hidrocabonetos

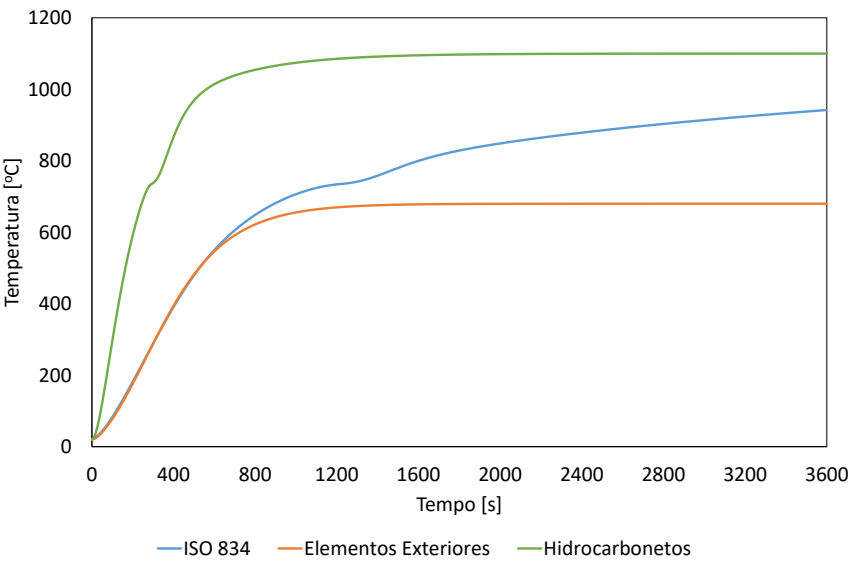


IPE 400

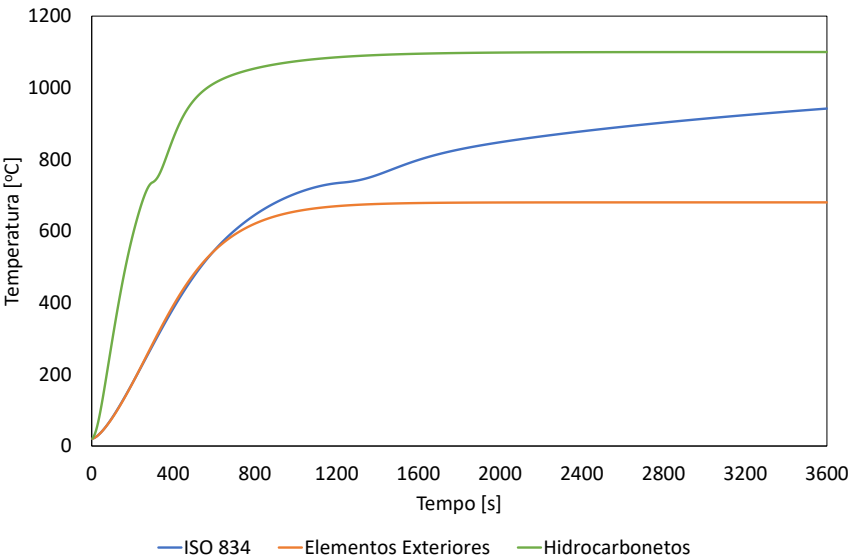


Perímetro [m]	1,4667
Área [m²]	0,008446
Fator de massividade [m ⁻¹]	173,66
Comprimento Característico [m]	0,0057

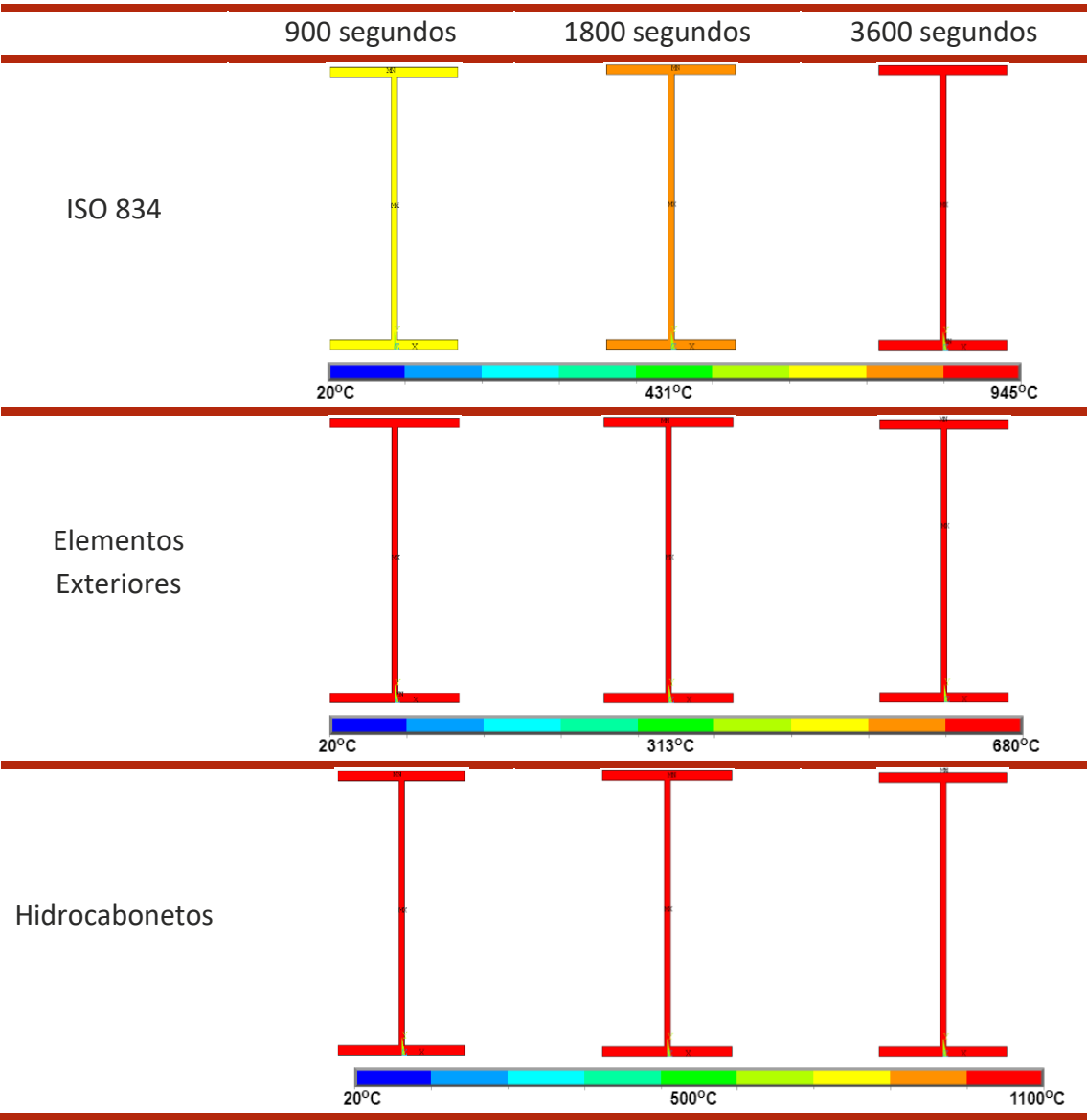
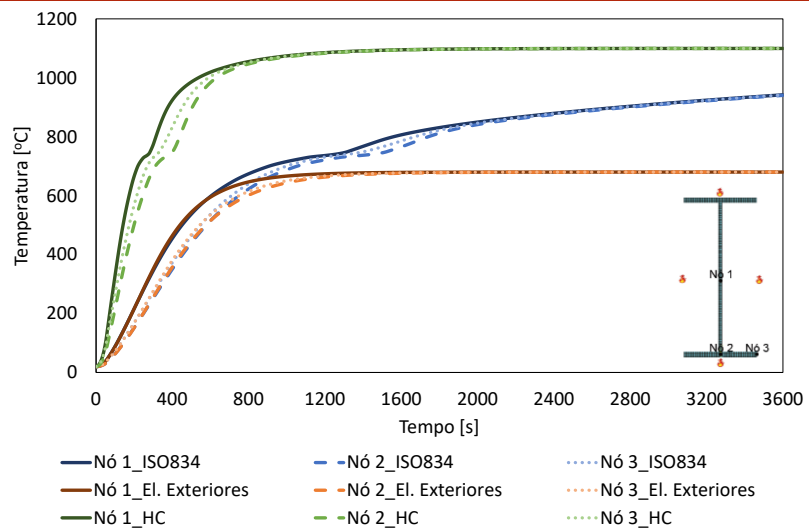
Método Simplificado do Eurocódigo 3



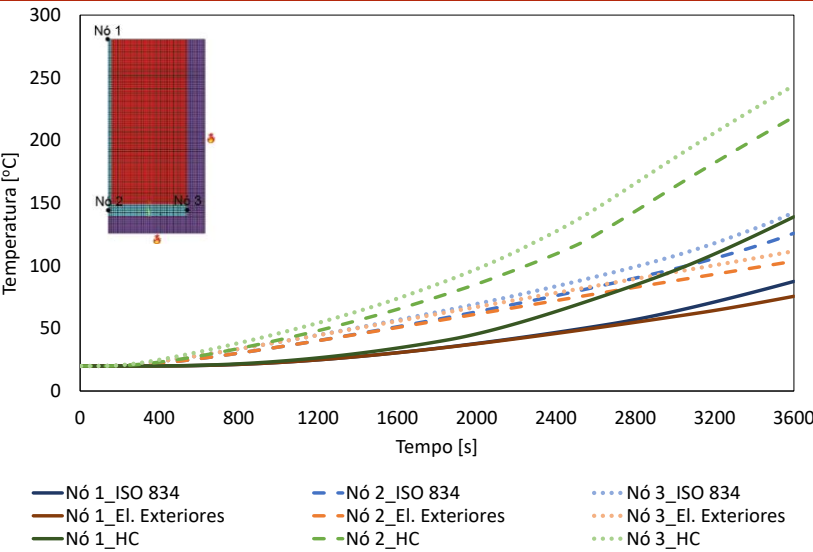
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

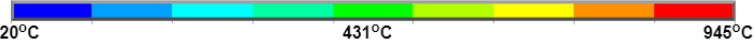
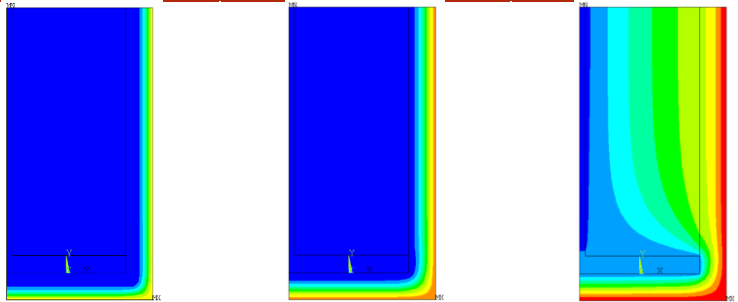


900 segundos

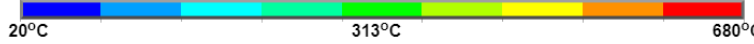
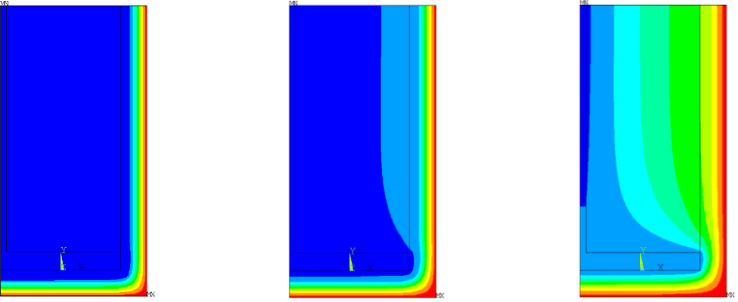
1800 segundos

3600 segundos

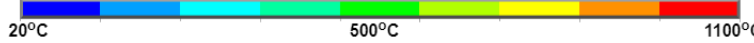
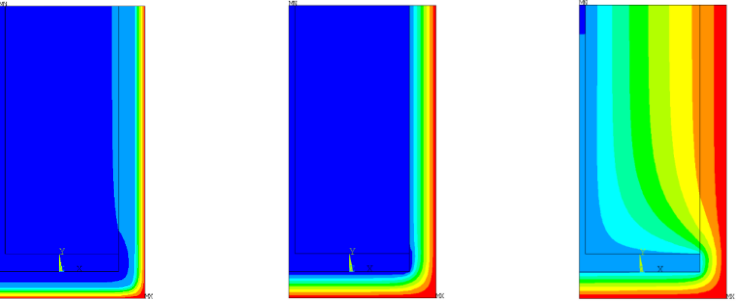
ISO 834



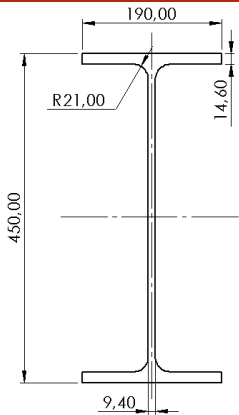
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

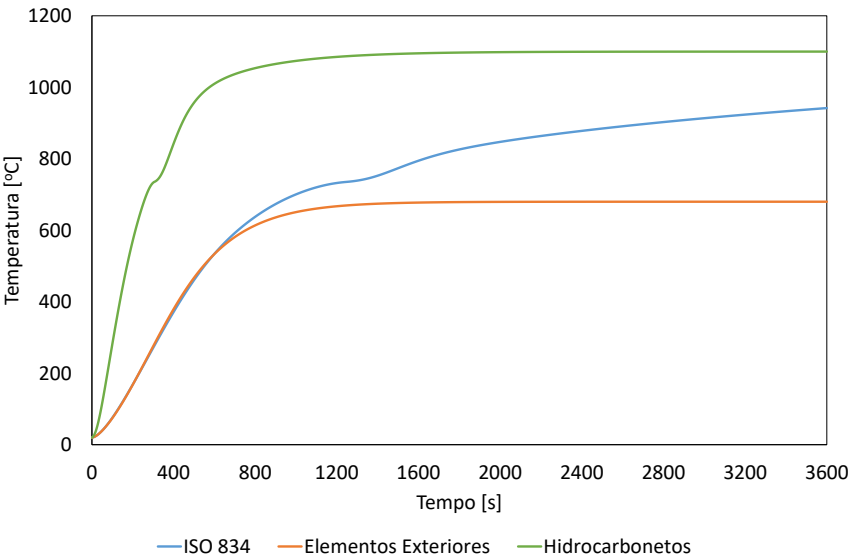


IPE 450

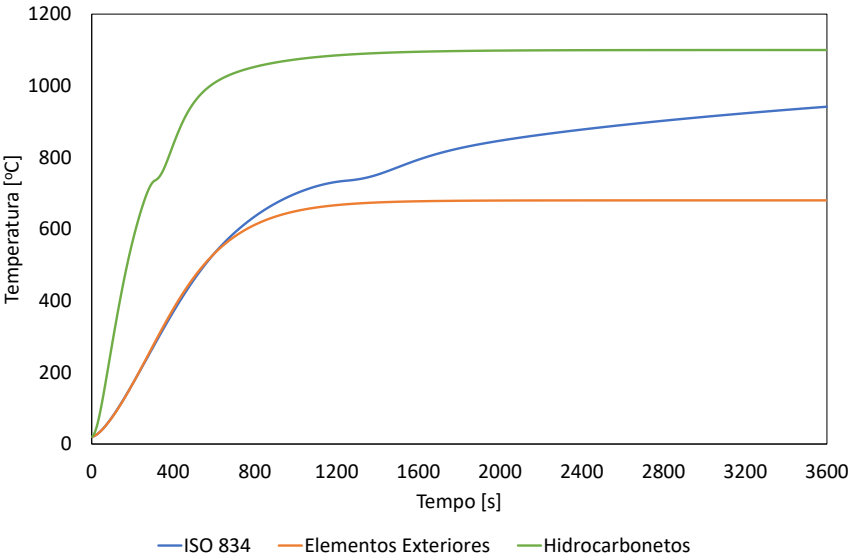


Perímetro [m]	1,6051
Área [m²]	0,009882
Fator de massividade [m ⁻¹]	162,43
Comprimento Característico [m]	0,0061

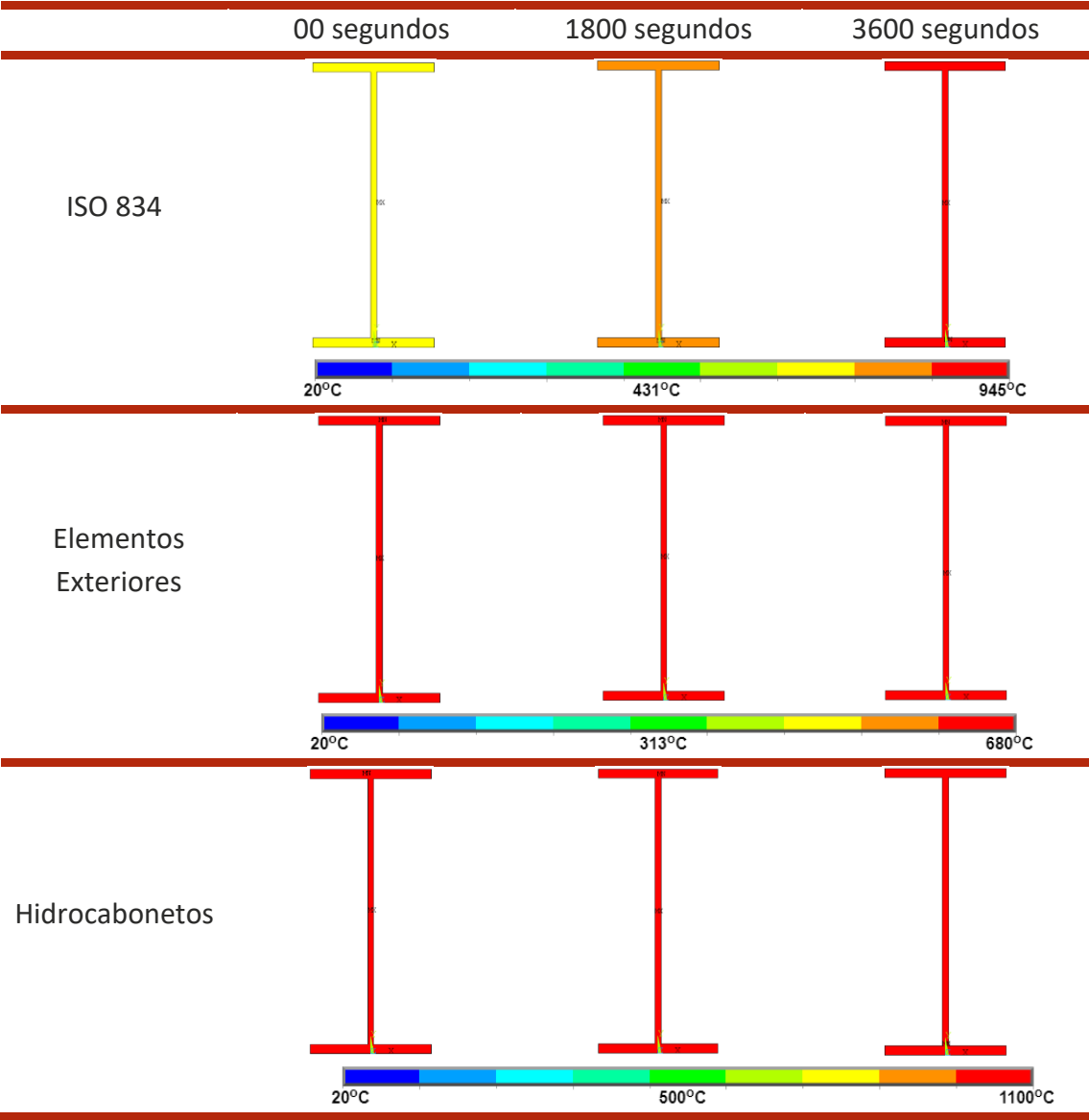
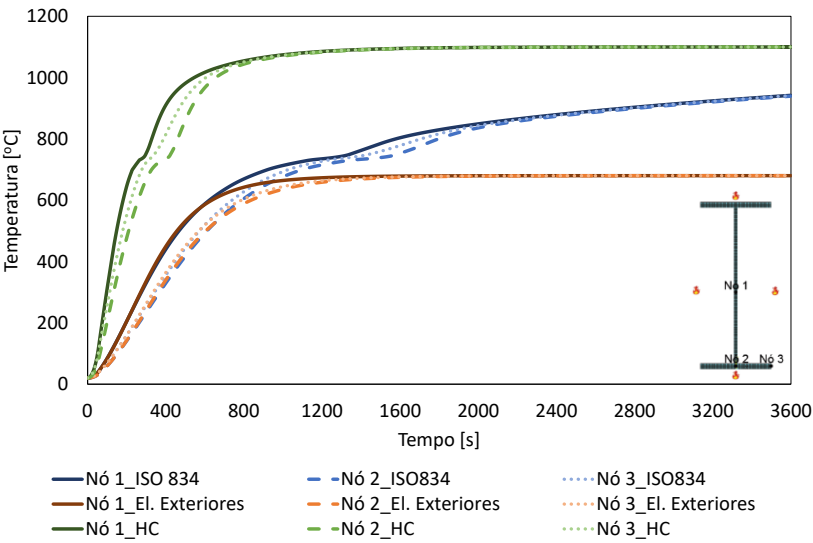
Método Simplificado do Eurocódigo 3



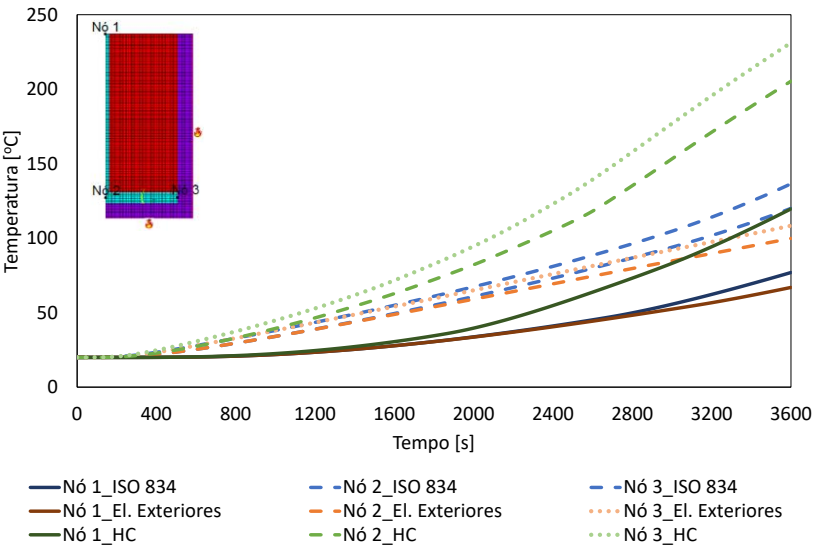
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

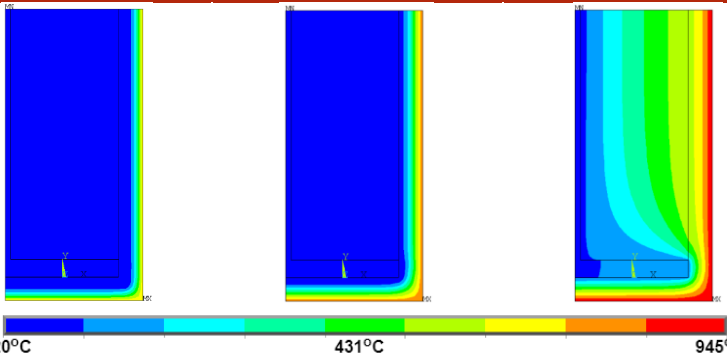


900 segundos

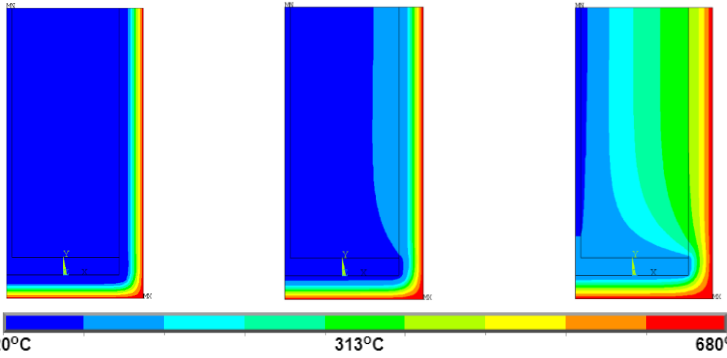
1800 segundos

3600 segundos

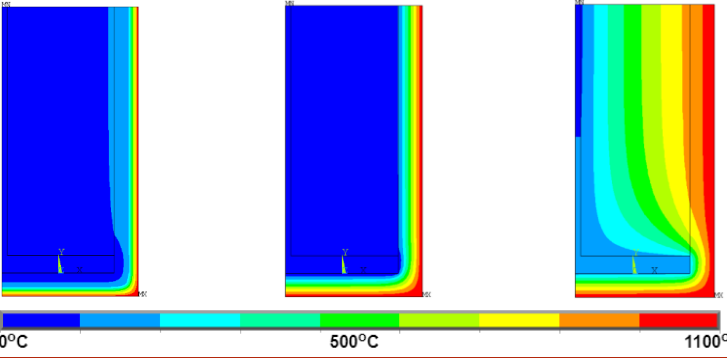
ISO 834



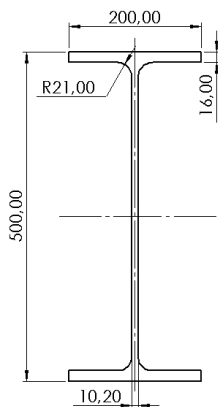
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

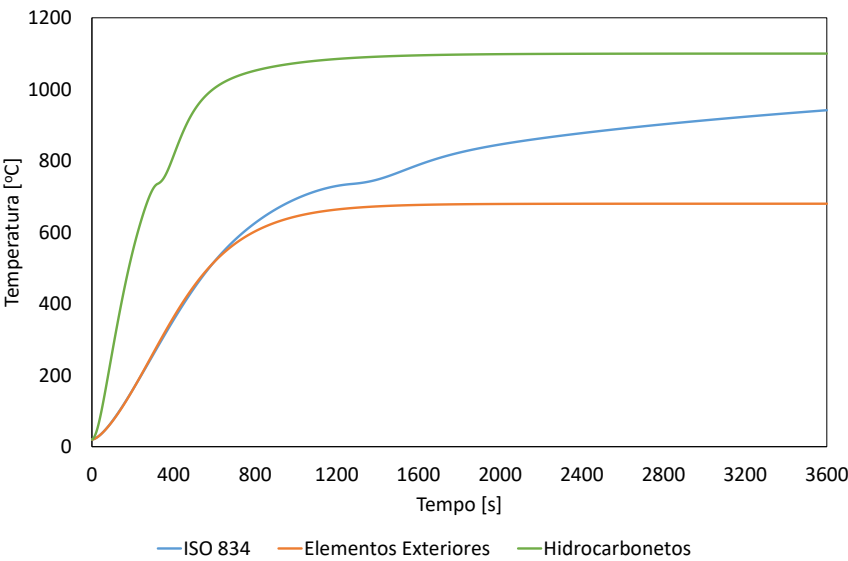


IPE 500

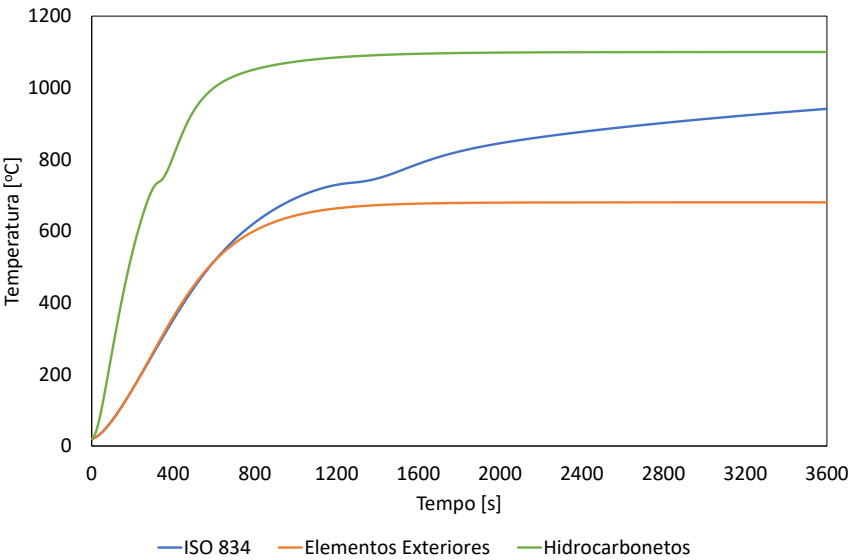


Perímetro [m]	1,7435
Área [m²]	0,01155
Fator de massividade [m ⁻¹]	150,96
Comprimento Característico [m]	0,0066

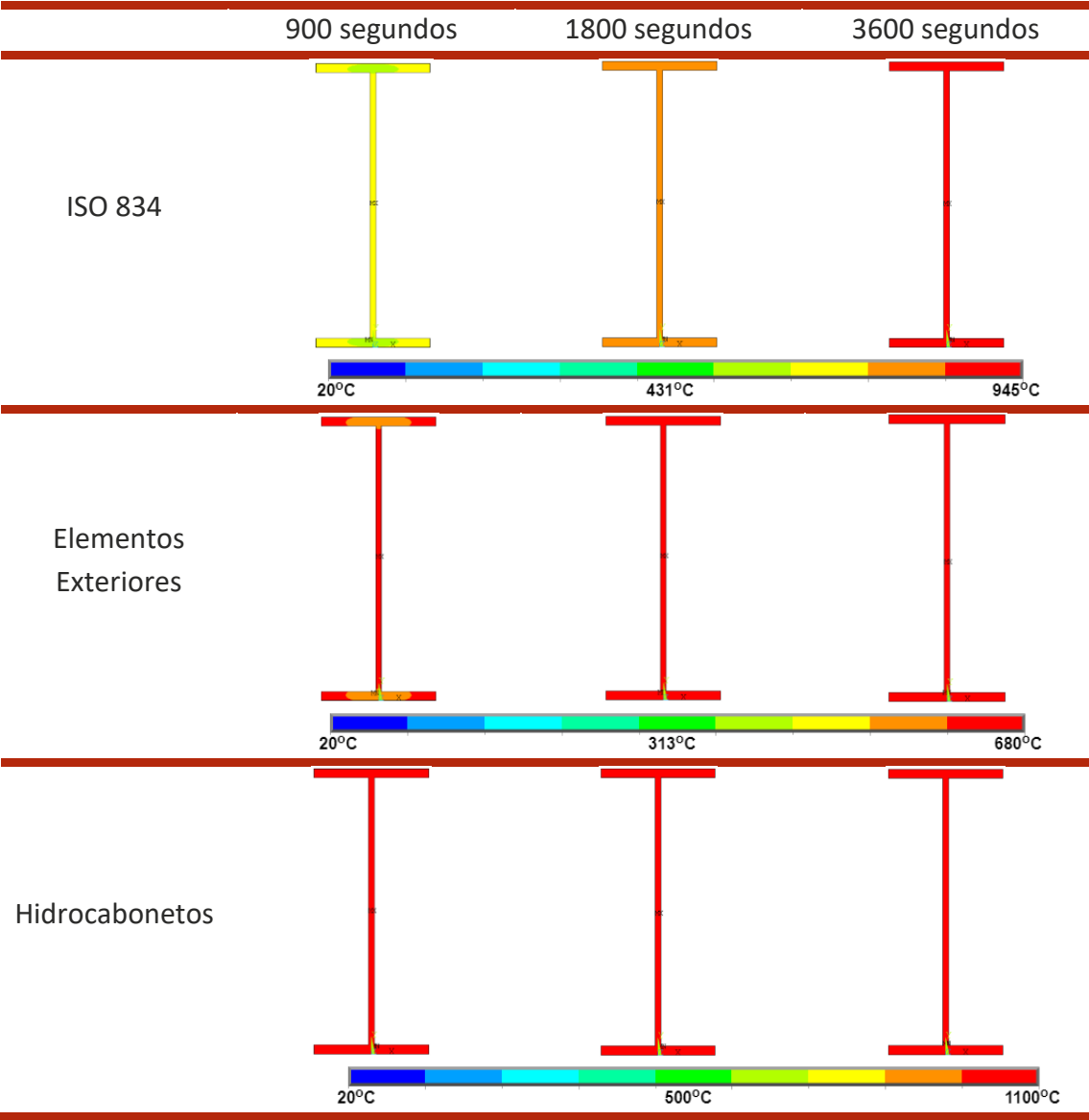
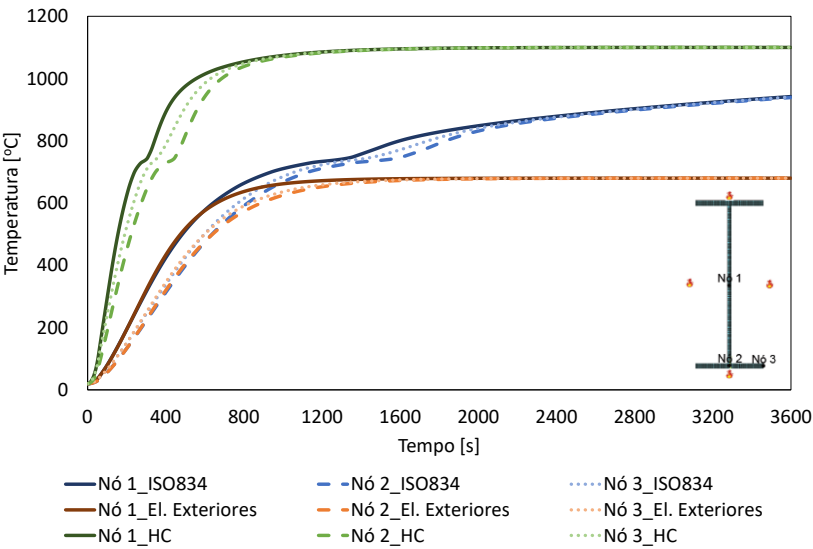
Método Simplificado do Eurocódigo 3



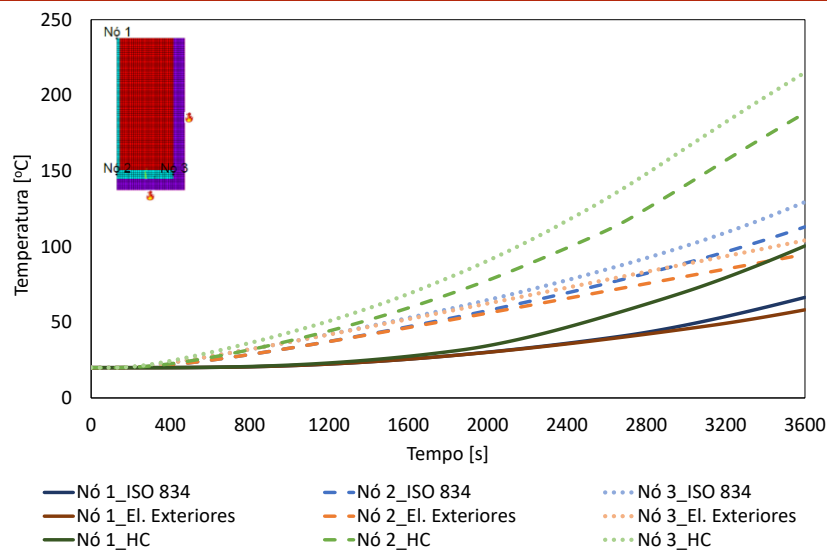
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

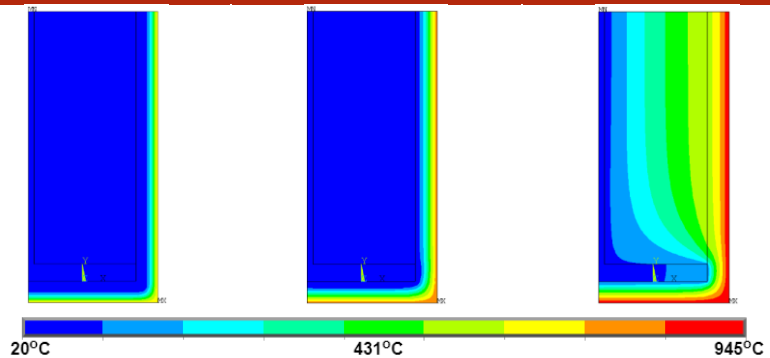


900 segundos

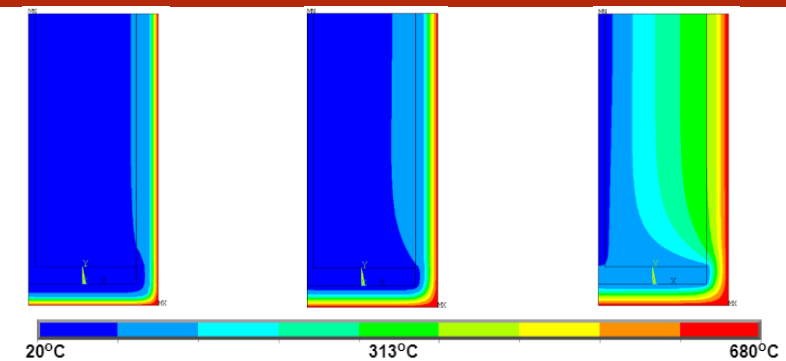
1800 segundos

3600 segundos

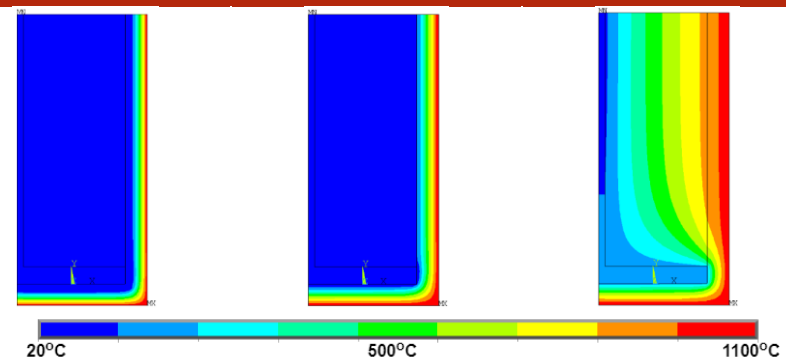
ISO 834



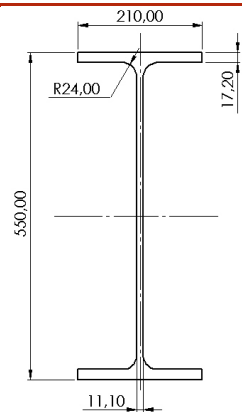
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

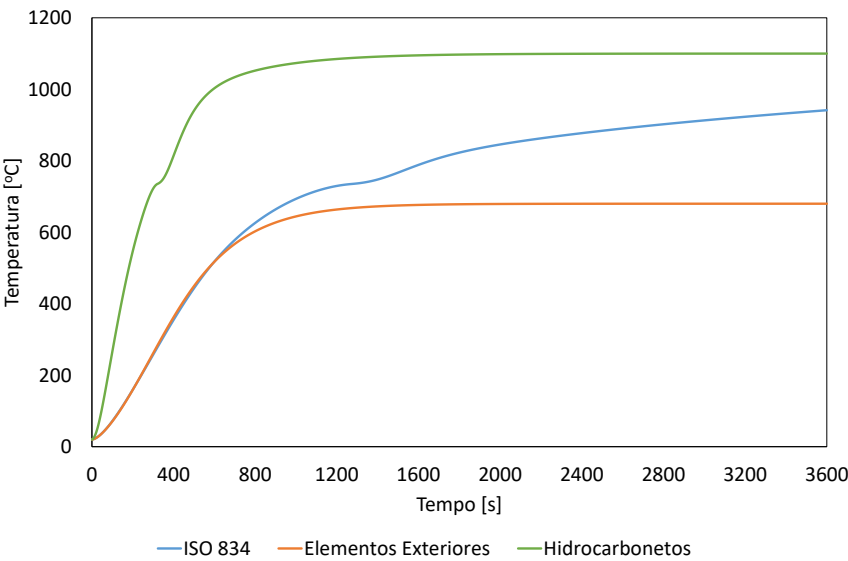


IPE 550

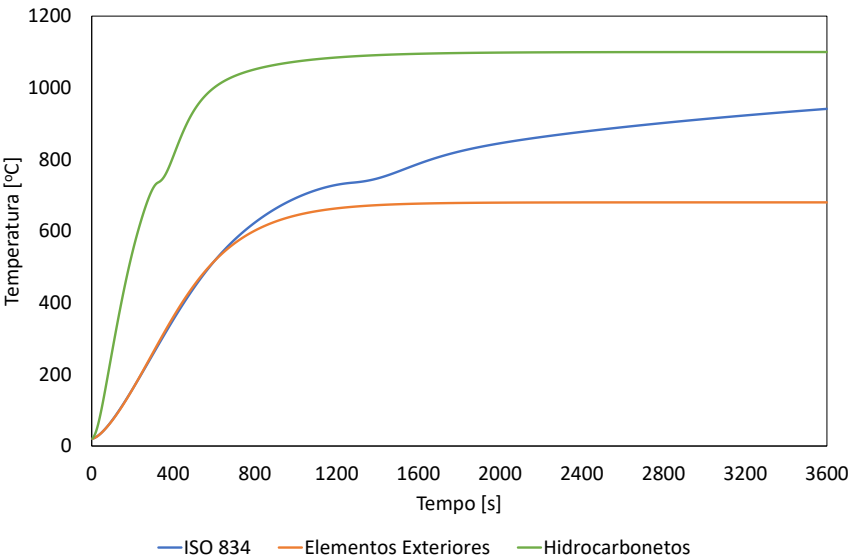


Perímetro [m]	1,7435
Área [m²]	0,01155
Fator de massividade [m ⁻¹]	150,96
Comprimento Característico [m]	0,0066

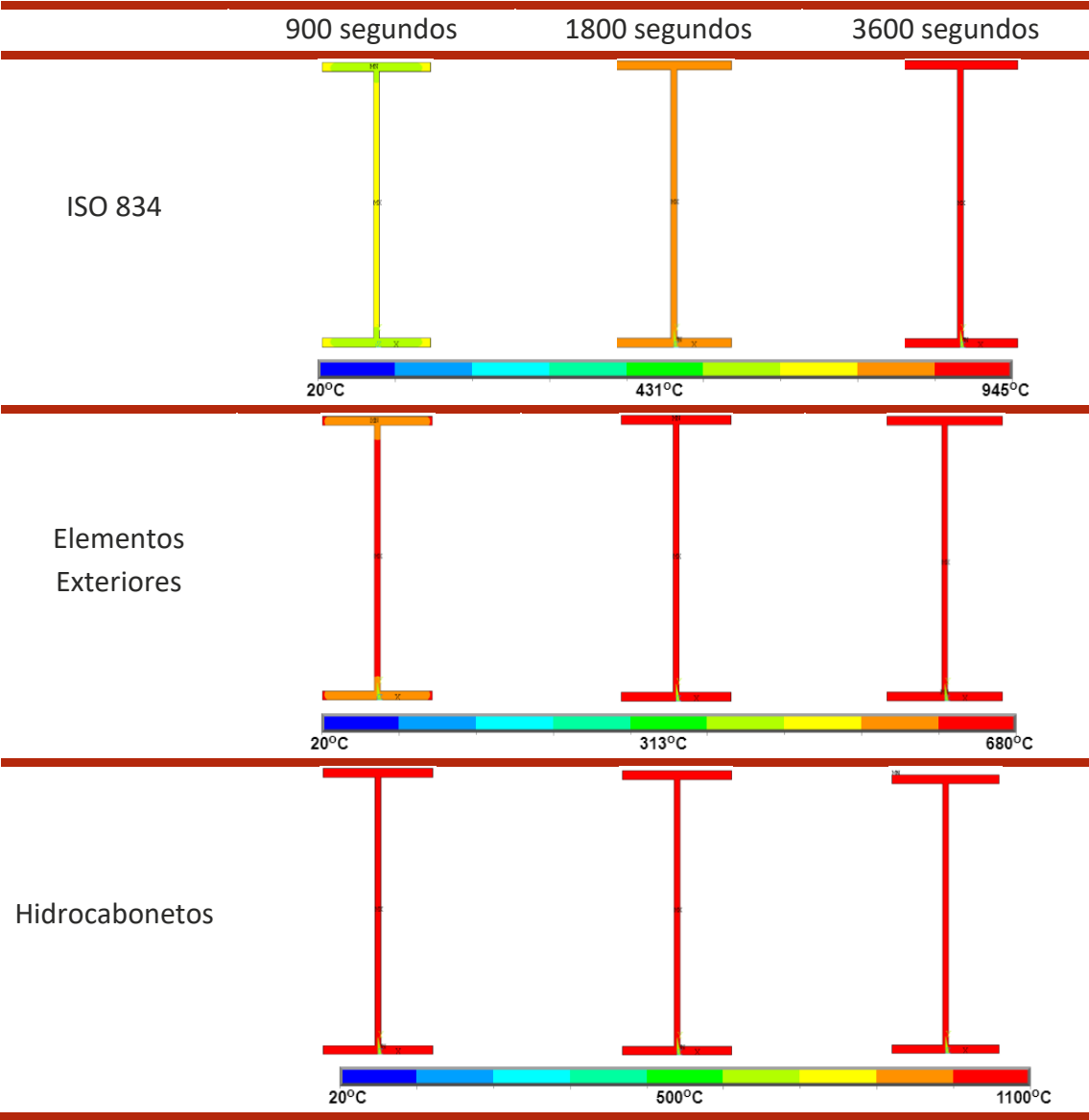
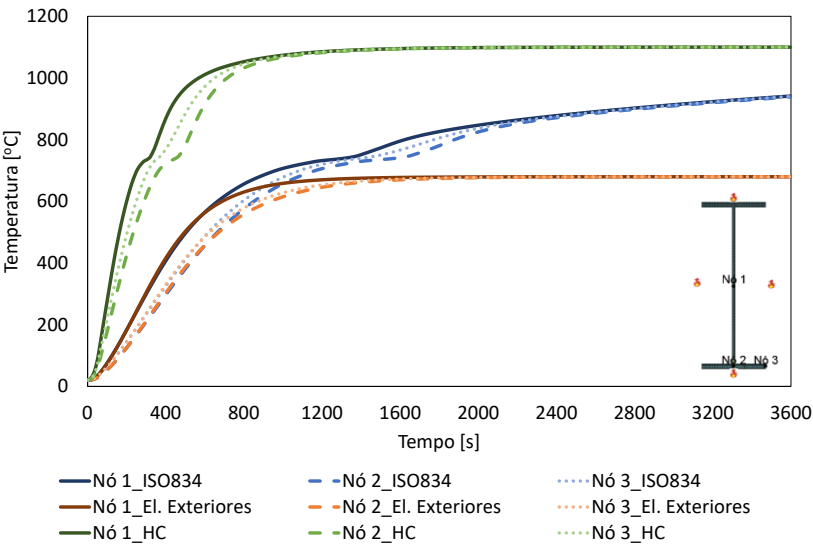
Método Simplificado do Eurocódigo 3



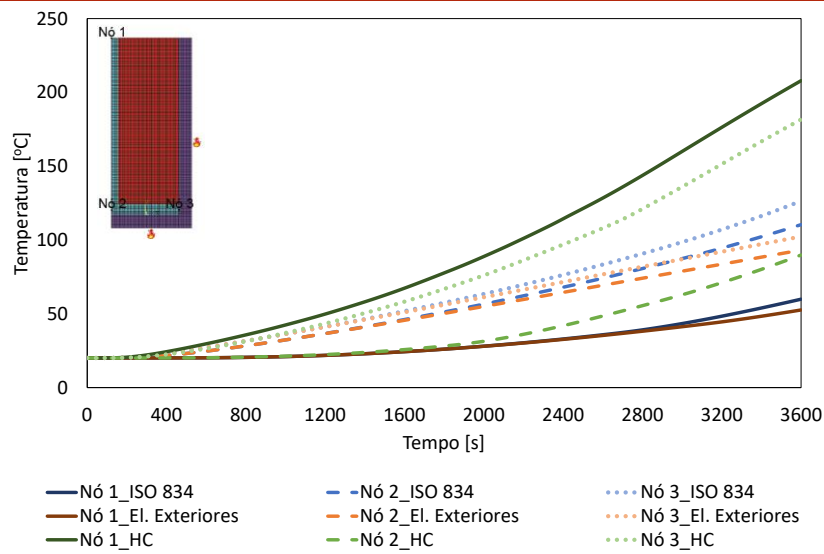
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

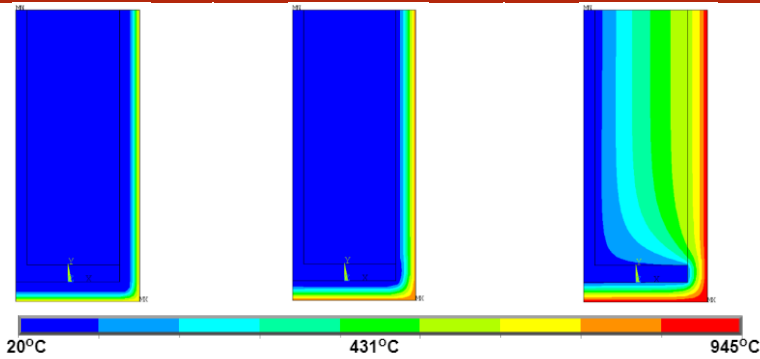


900 segundos

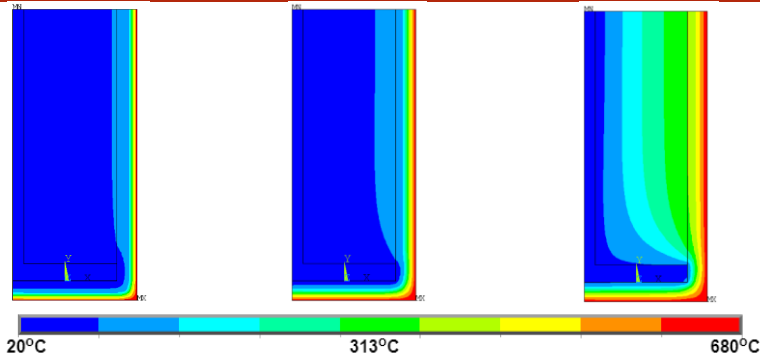
1800 segundos

3600 segundos

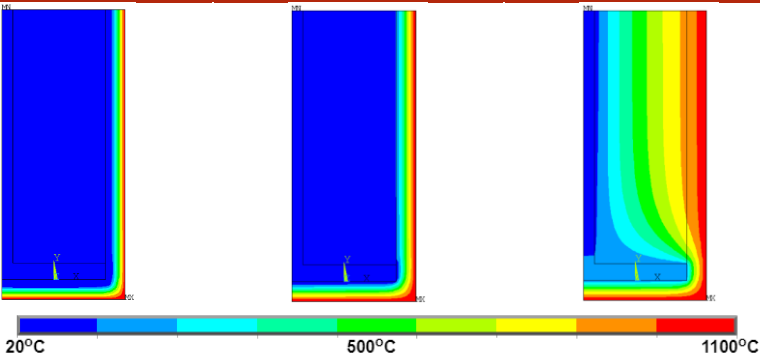
ISO 834



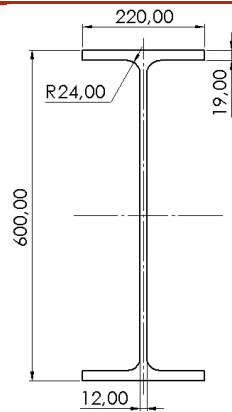
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

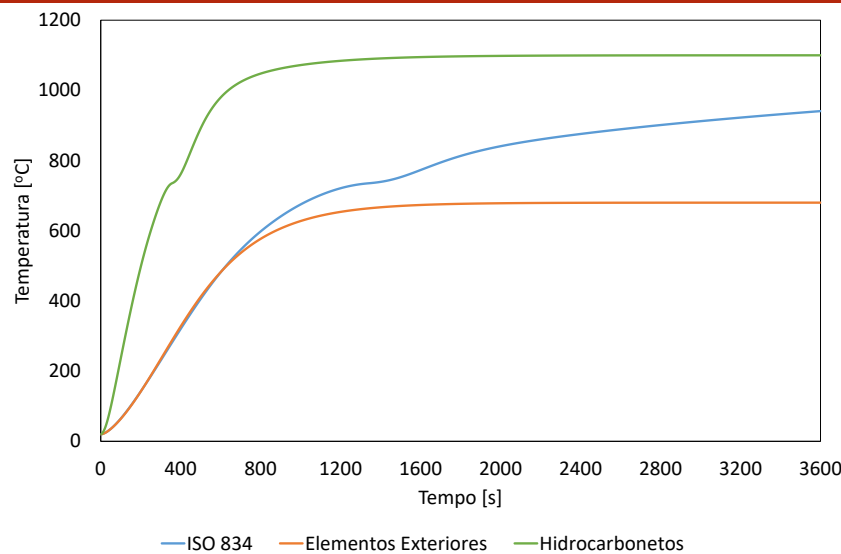


IPE 600

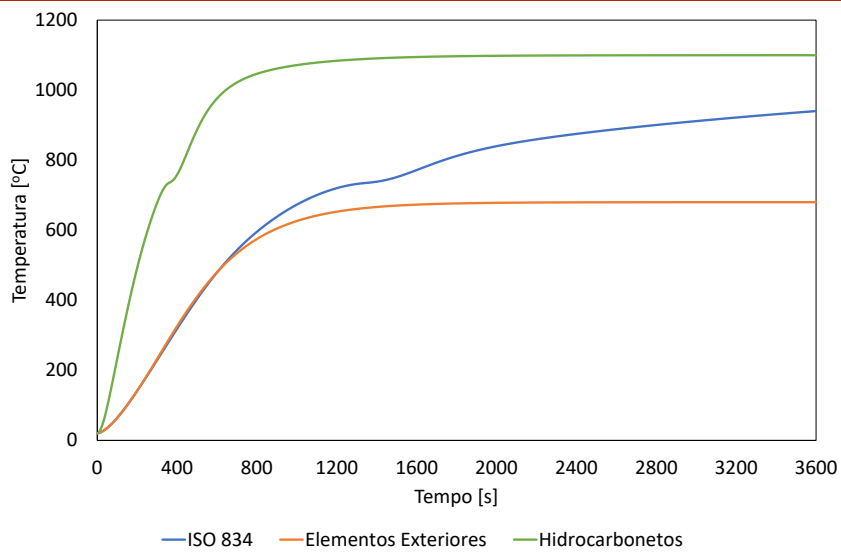


Perímetro [m]	2,0147
Área [m²]	0,01560
Fator de massividade [m ⁻¹]	129,15
Comprimento Característico [m]	0,0077

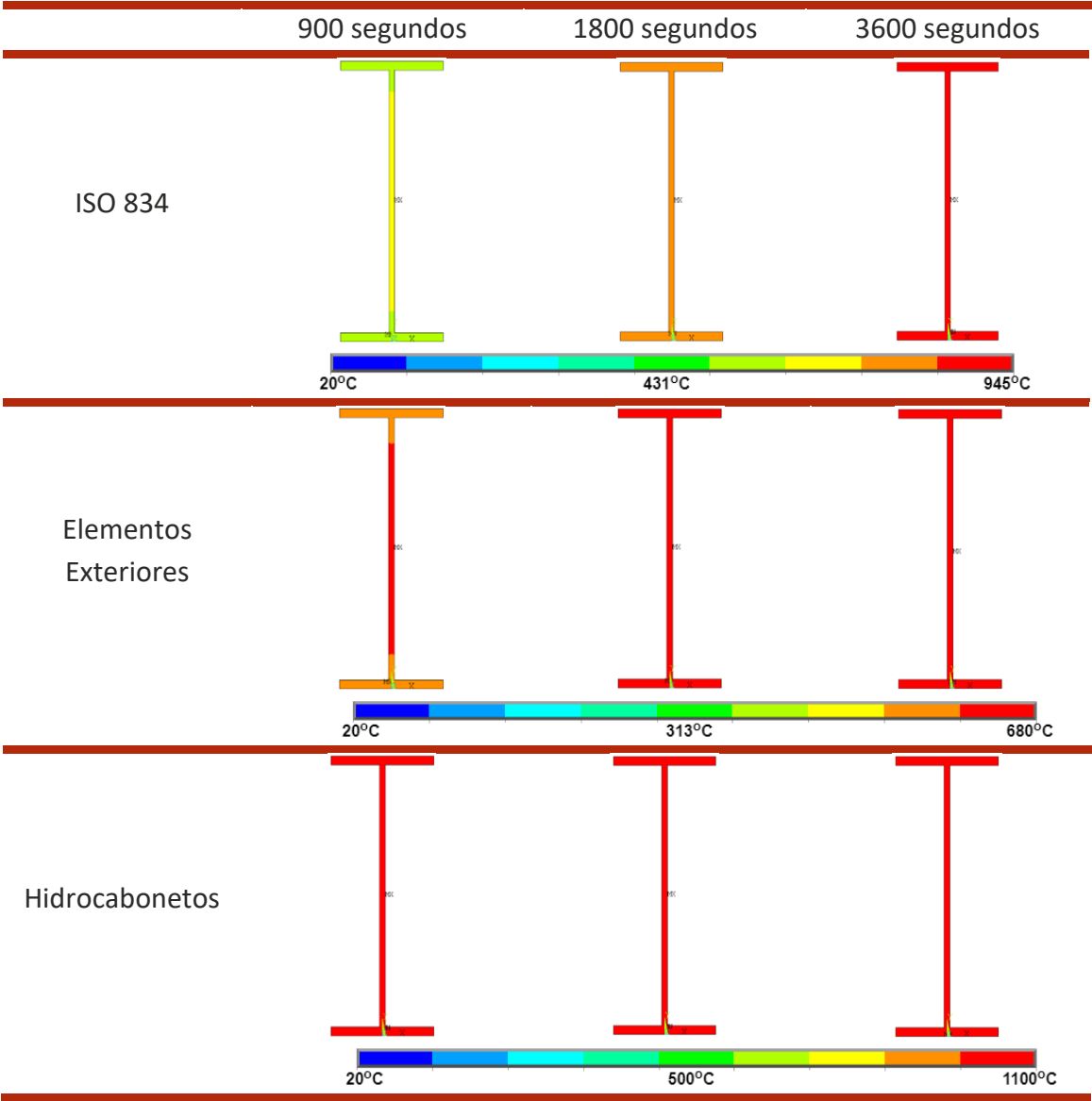
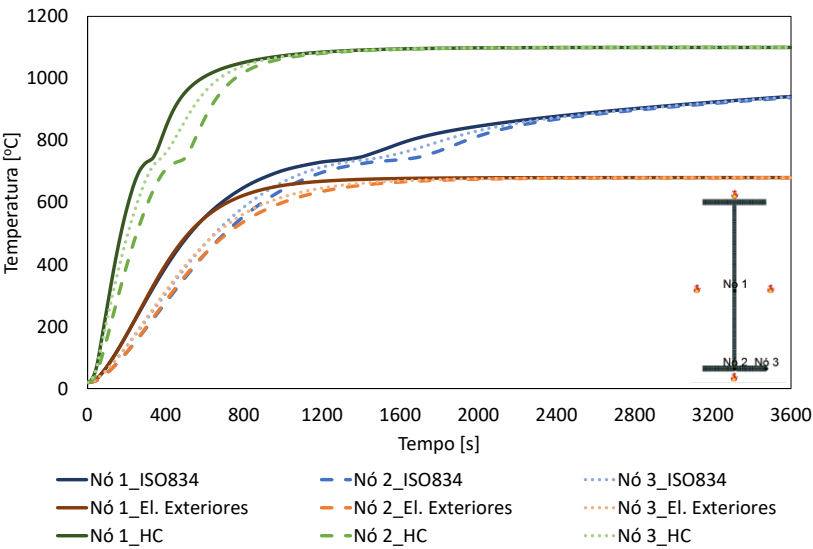
Método Simplificado do Eucódigo 3



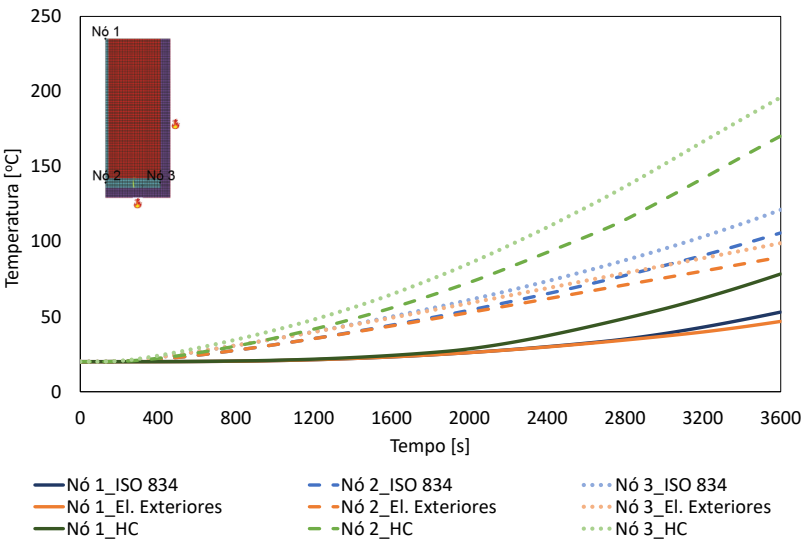
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)

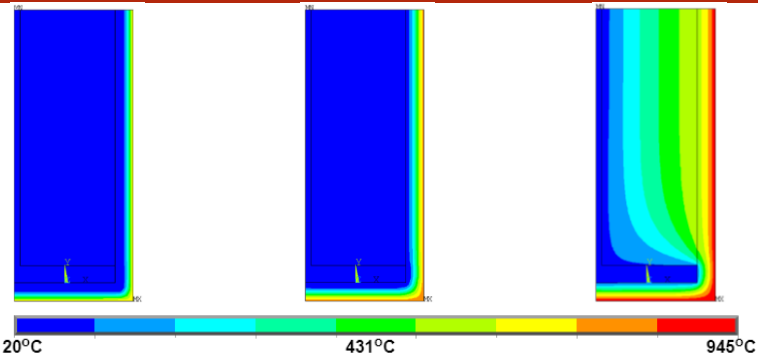


Método Numérico (Perfil Protegido)

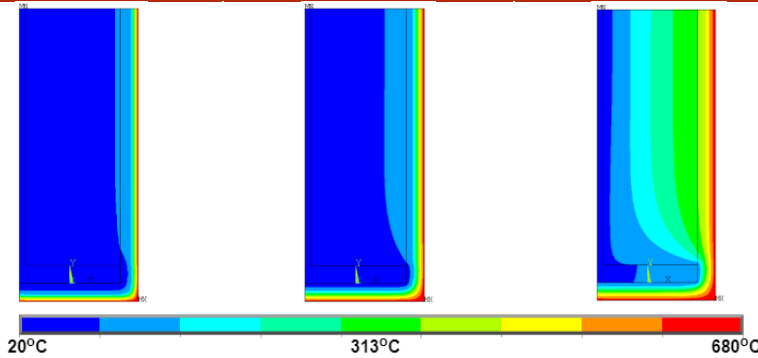


900 segundos 1800 segundos 3600 segundos

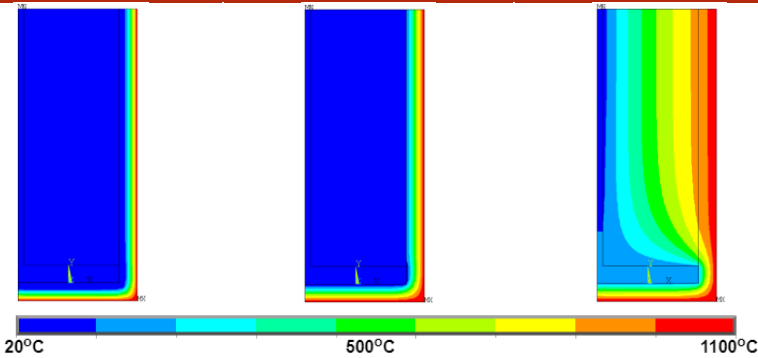
ISO 834



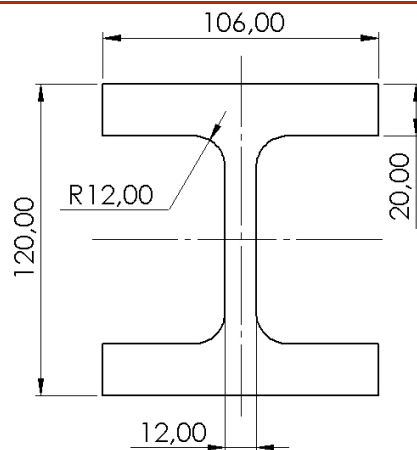
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

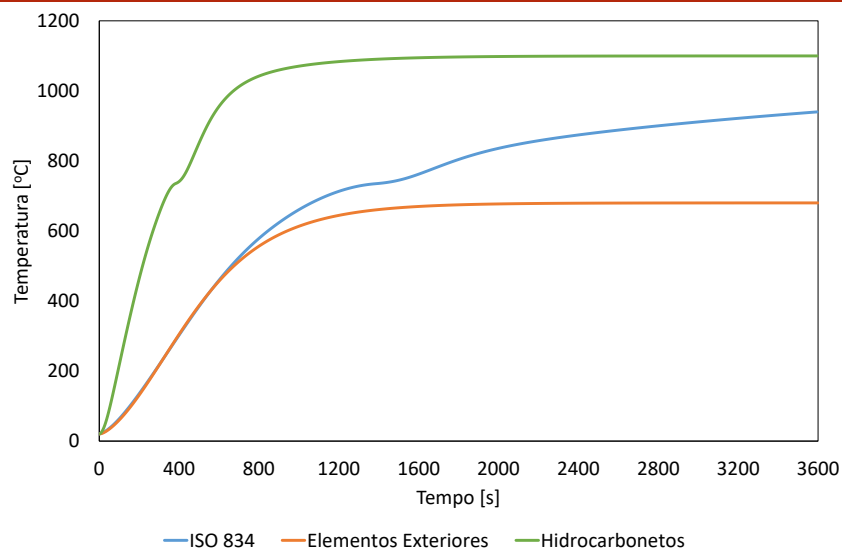


HEM 100

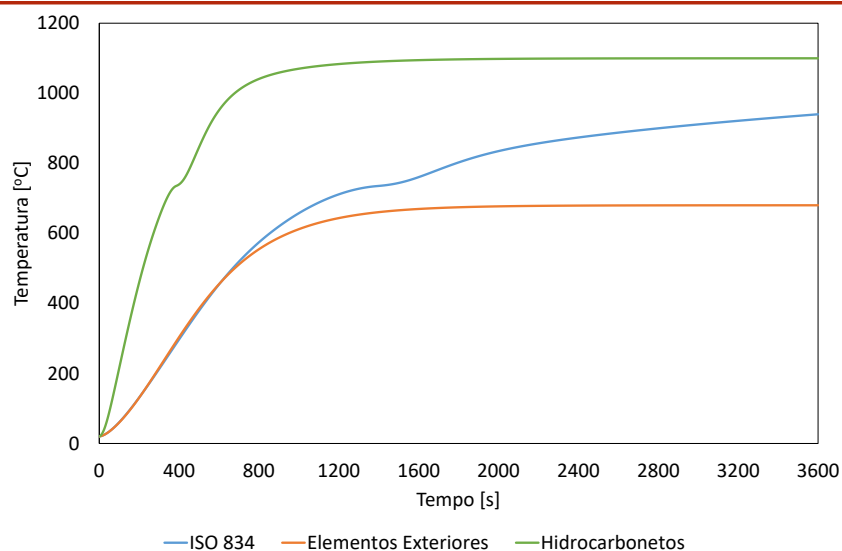


Perímetro [m]	0,6193
Área [m ²]	0,005324
Fator de massividade [m ⁻¹]	116,34
Comprimento Característico [m]	0,0086

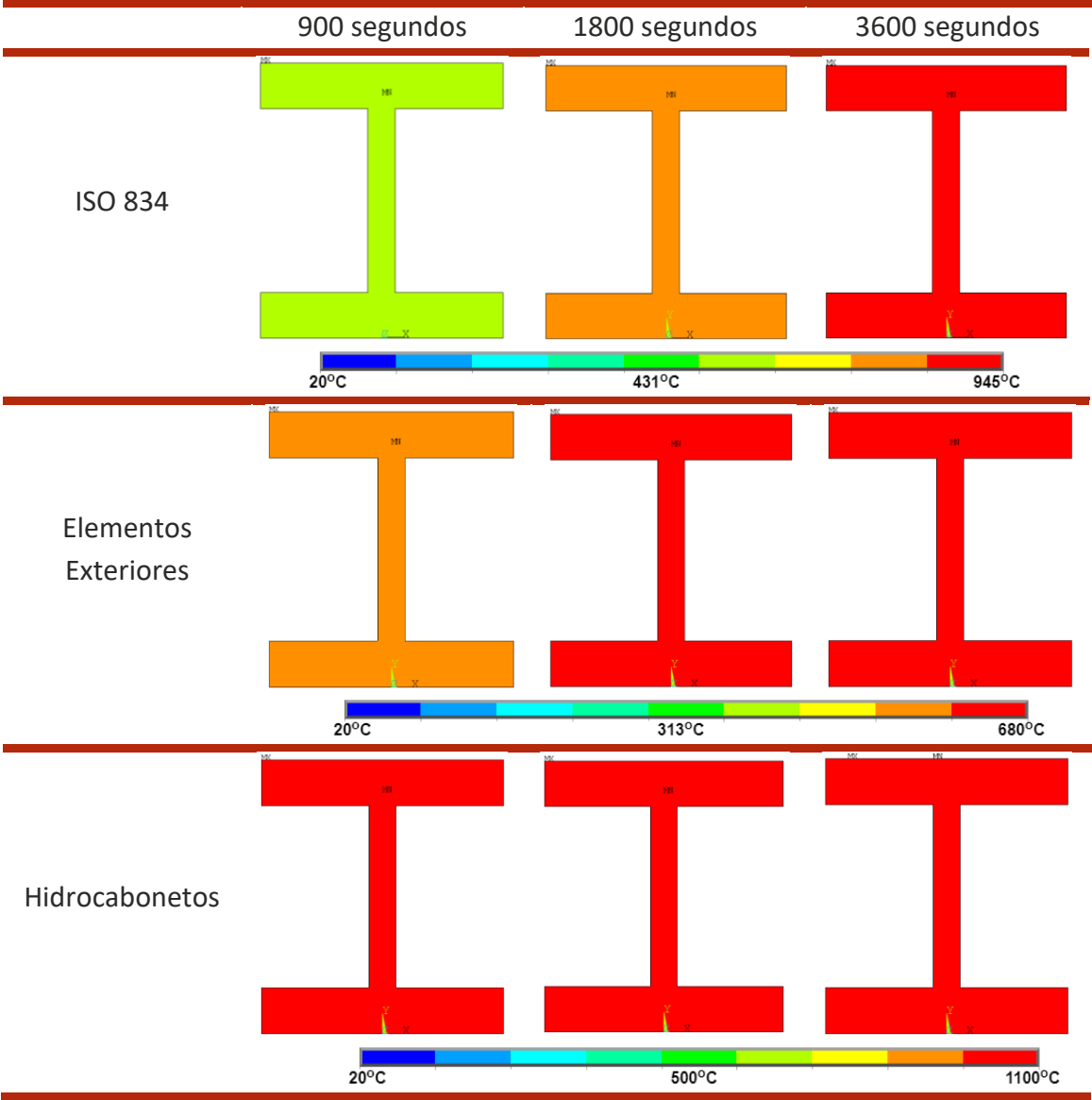
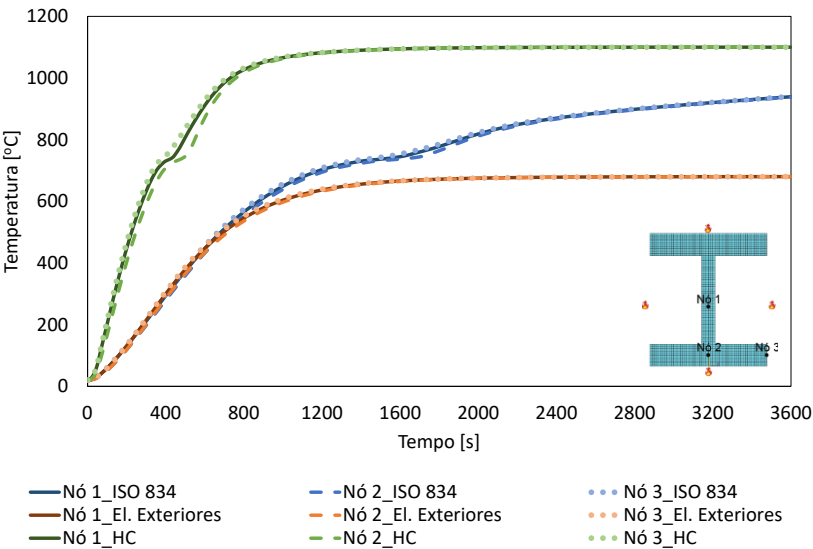
Método Simplificado do Eurocódigo 3



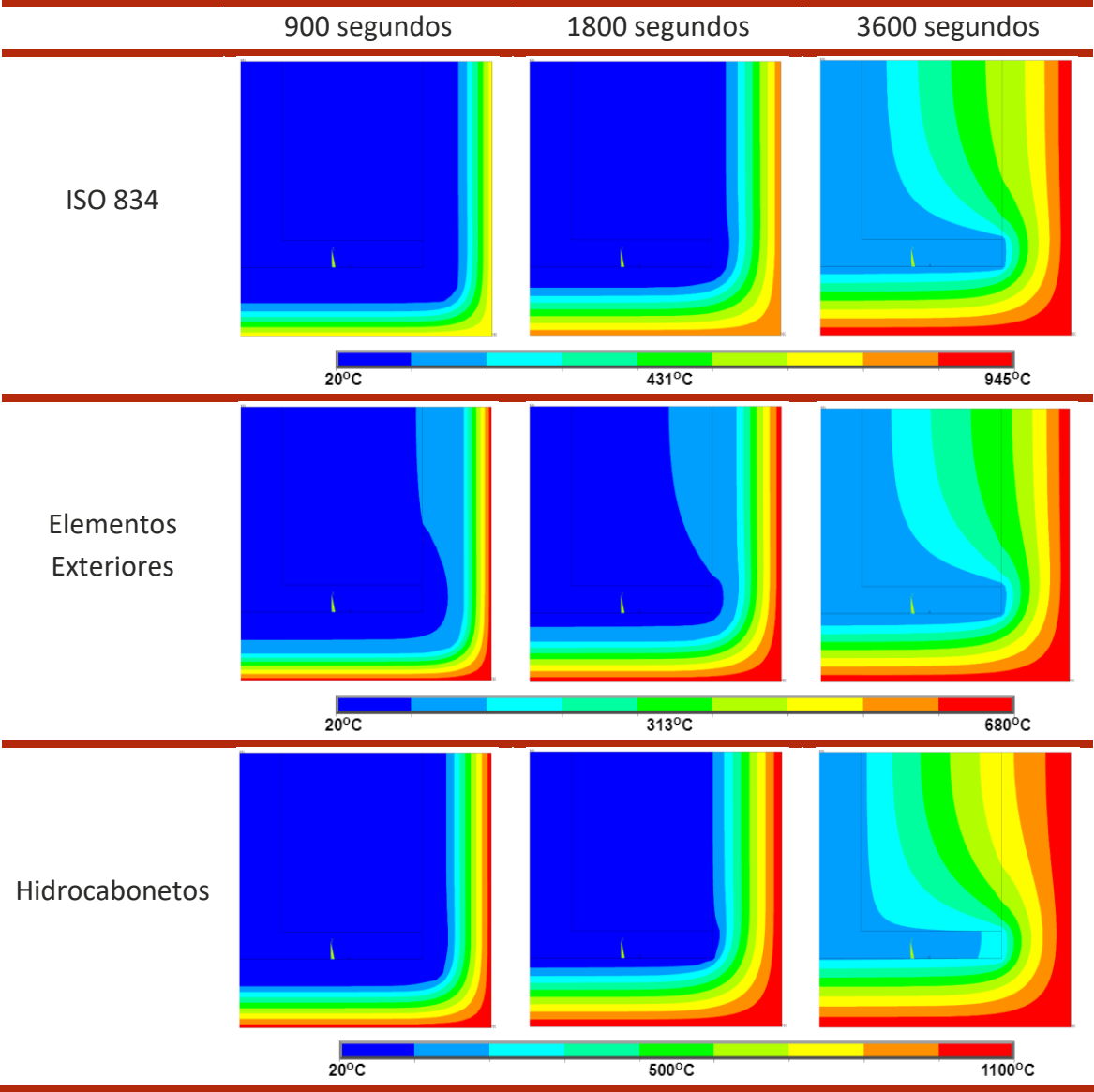
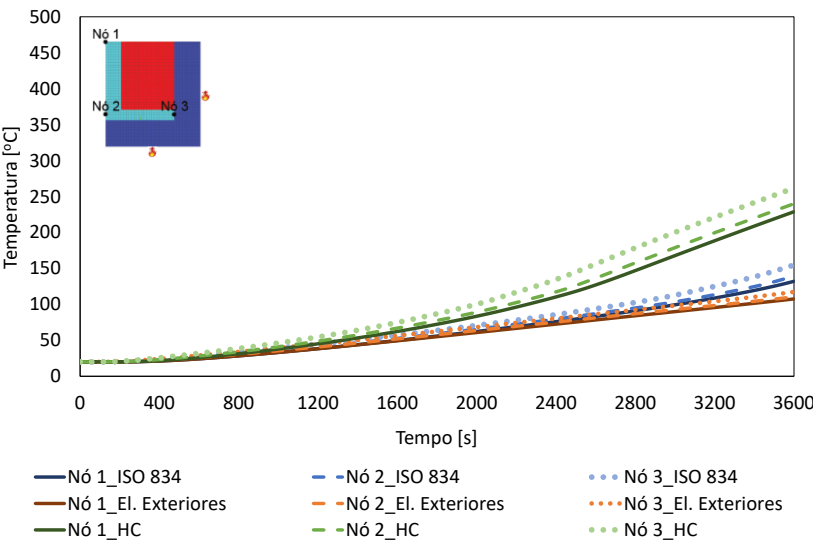
Método da Capacitância Global



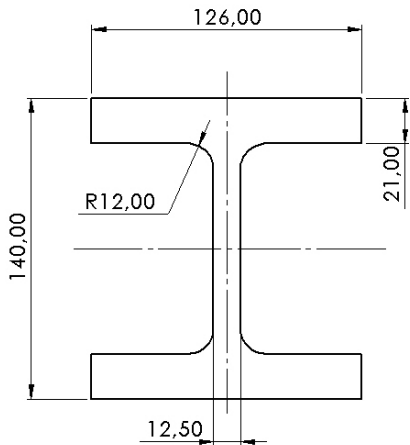
Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

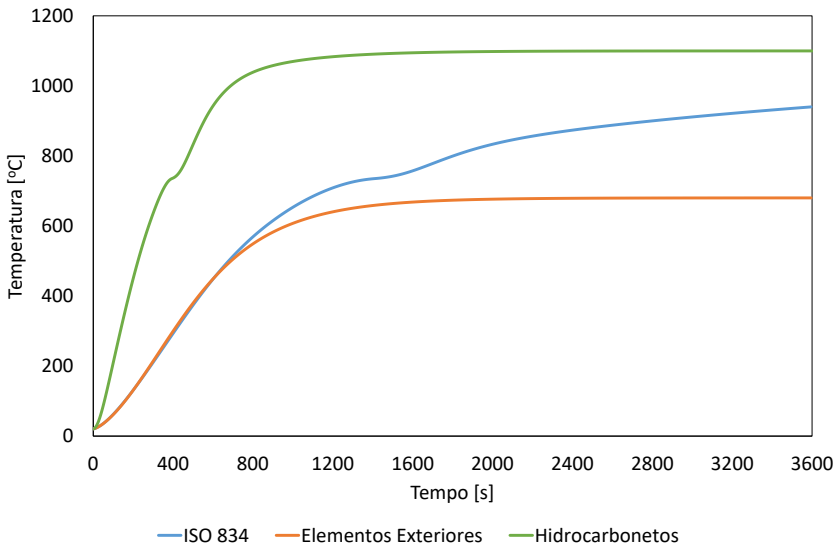


HEM 120

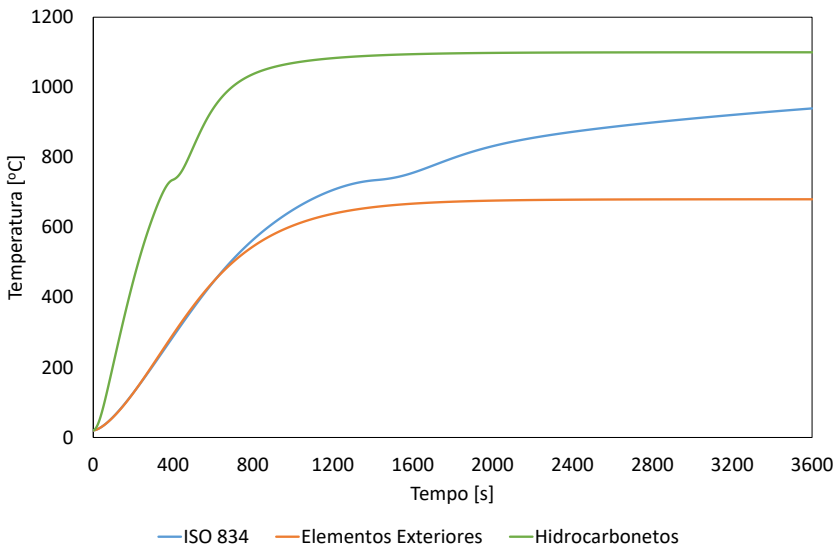


Perímetro [m]	0,7383
Área [m²]	0,006641
Fator de massividade [m ⁻¹]	111,19
Comprimento Característico [m]	0,0090

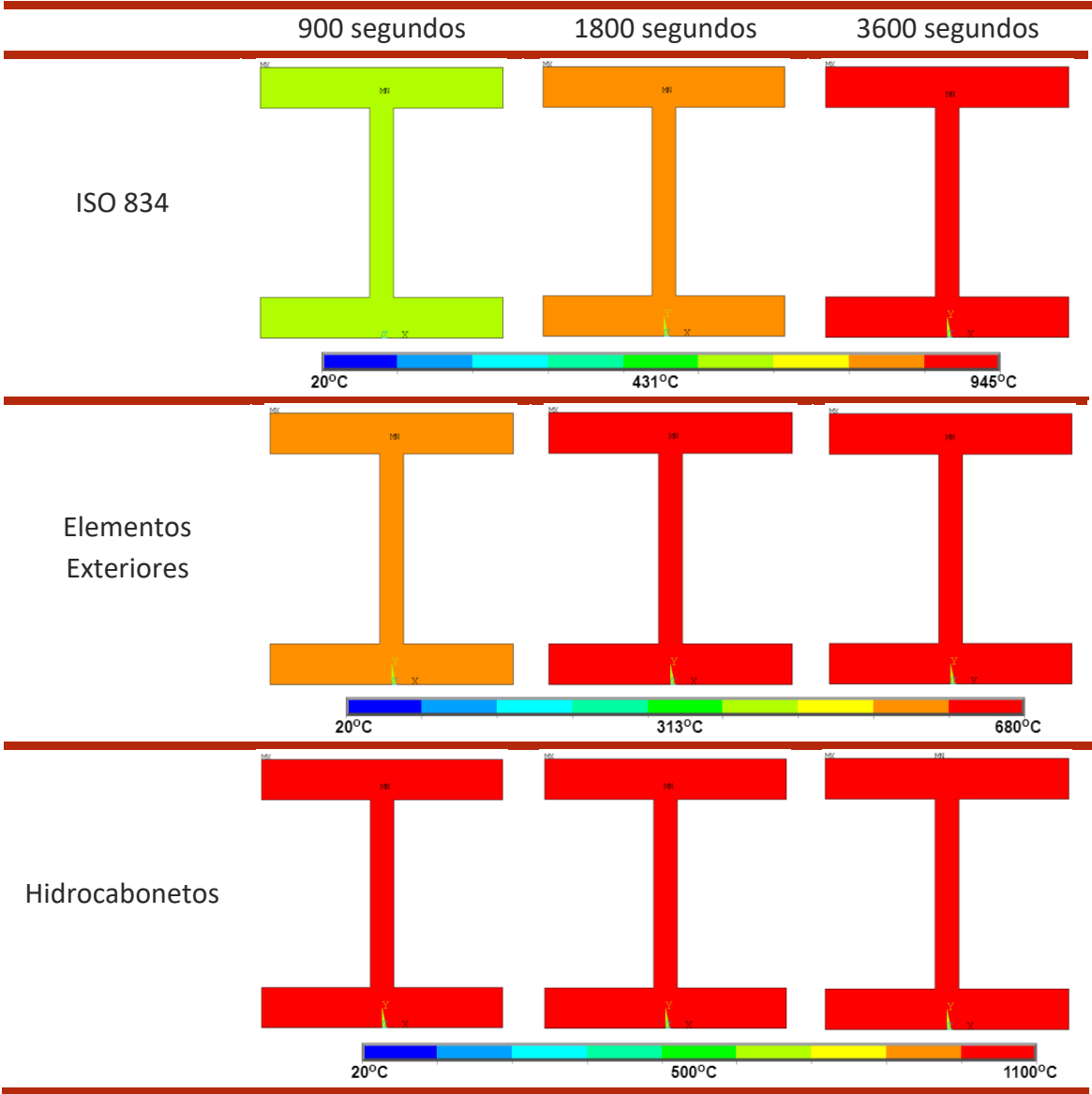
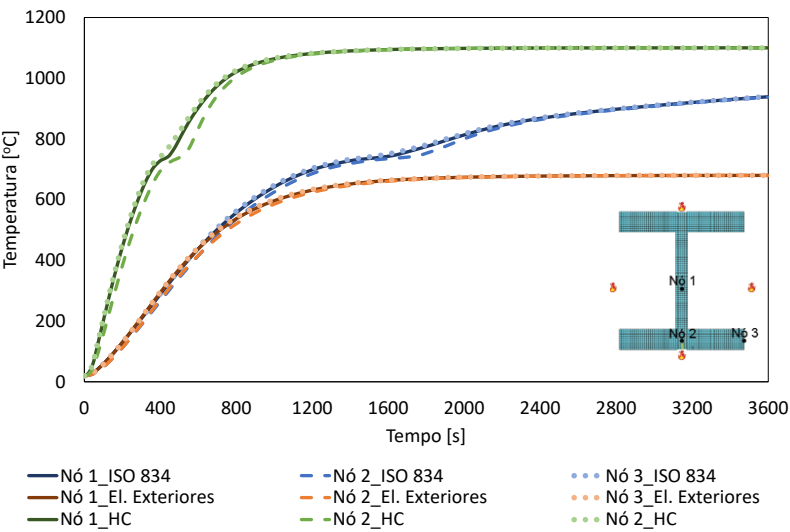
Método Simplificado do Eurocódigo 3



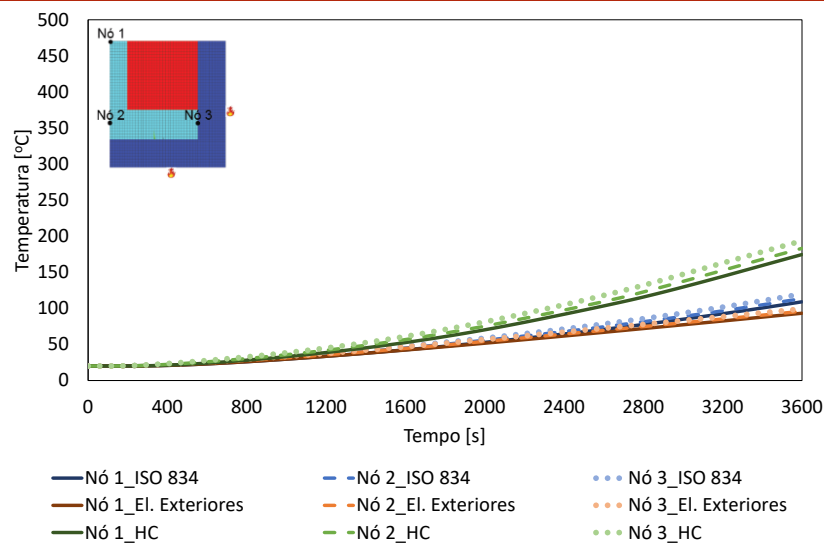
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

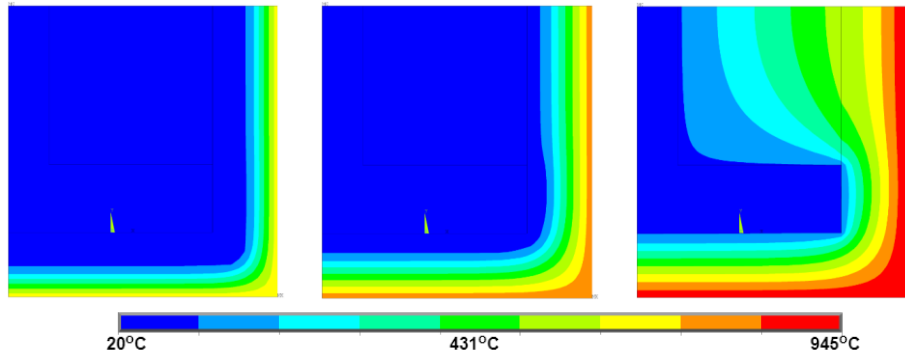
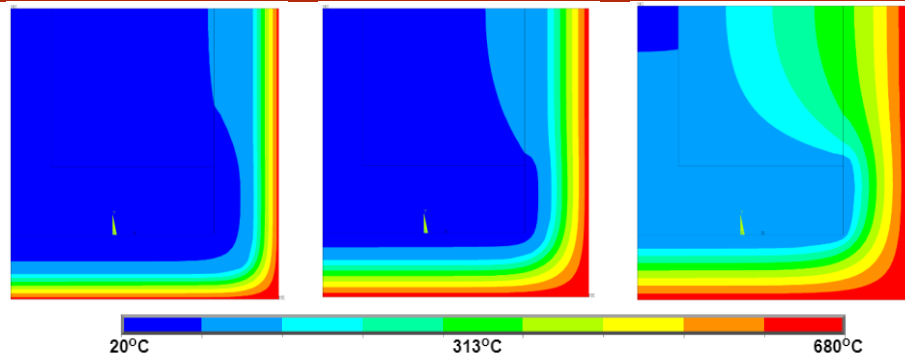


900 segundos

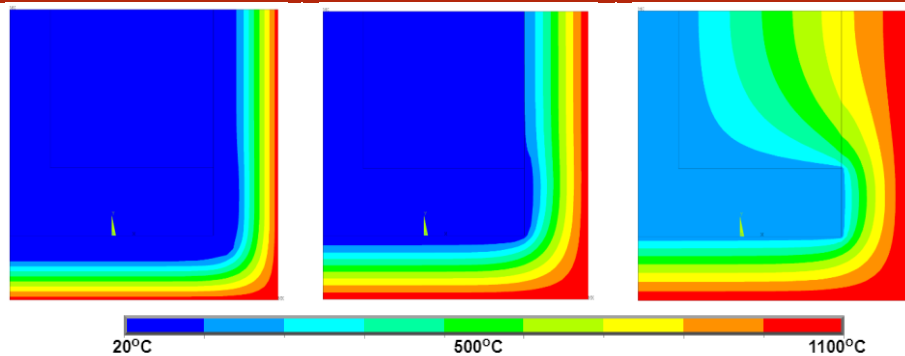
1800 segundos

3600 segundos

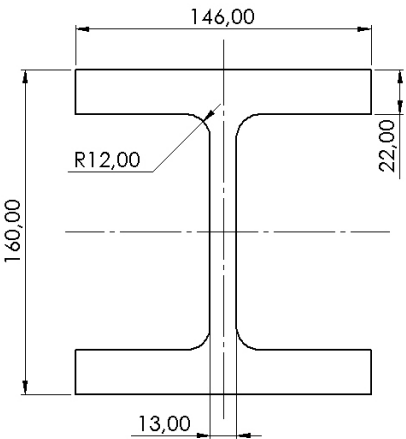
ISO 834

Elementos
Exteriores

Hidrocarbonetos

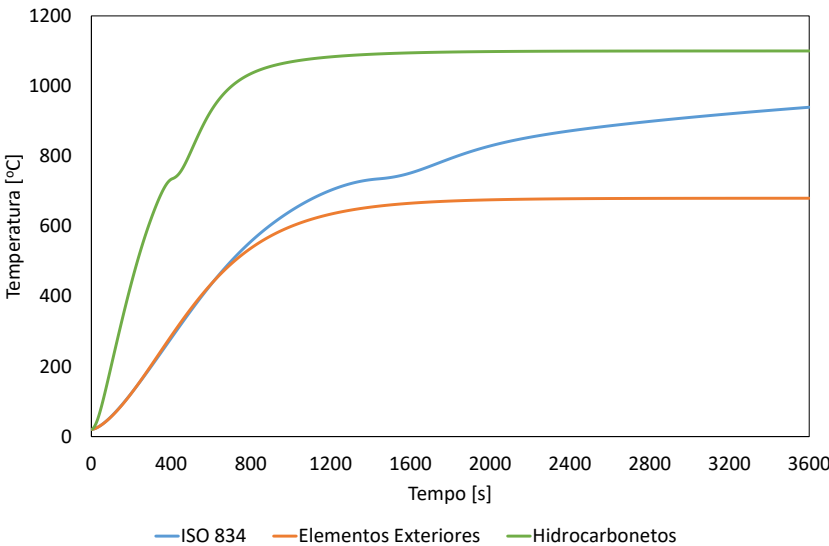


HEM 140

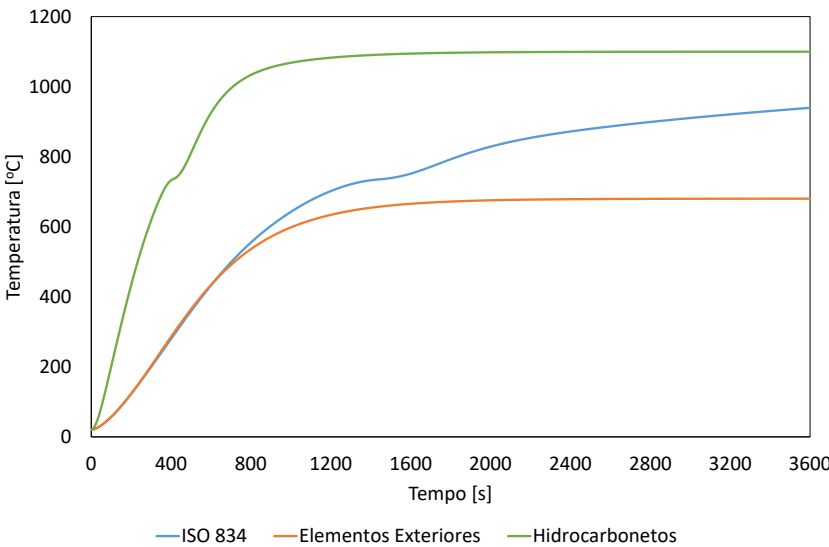


Perímetro [m]	0,8593
Área [m²]	0,008056
Fator de massividade [m ⁻¹]	106,68
Comprimento Característico [m]	0,0094

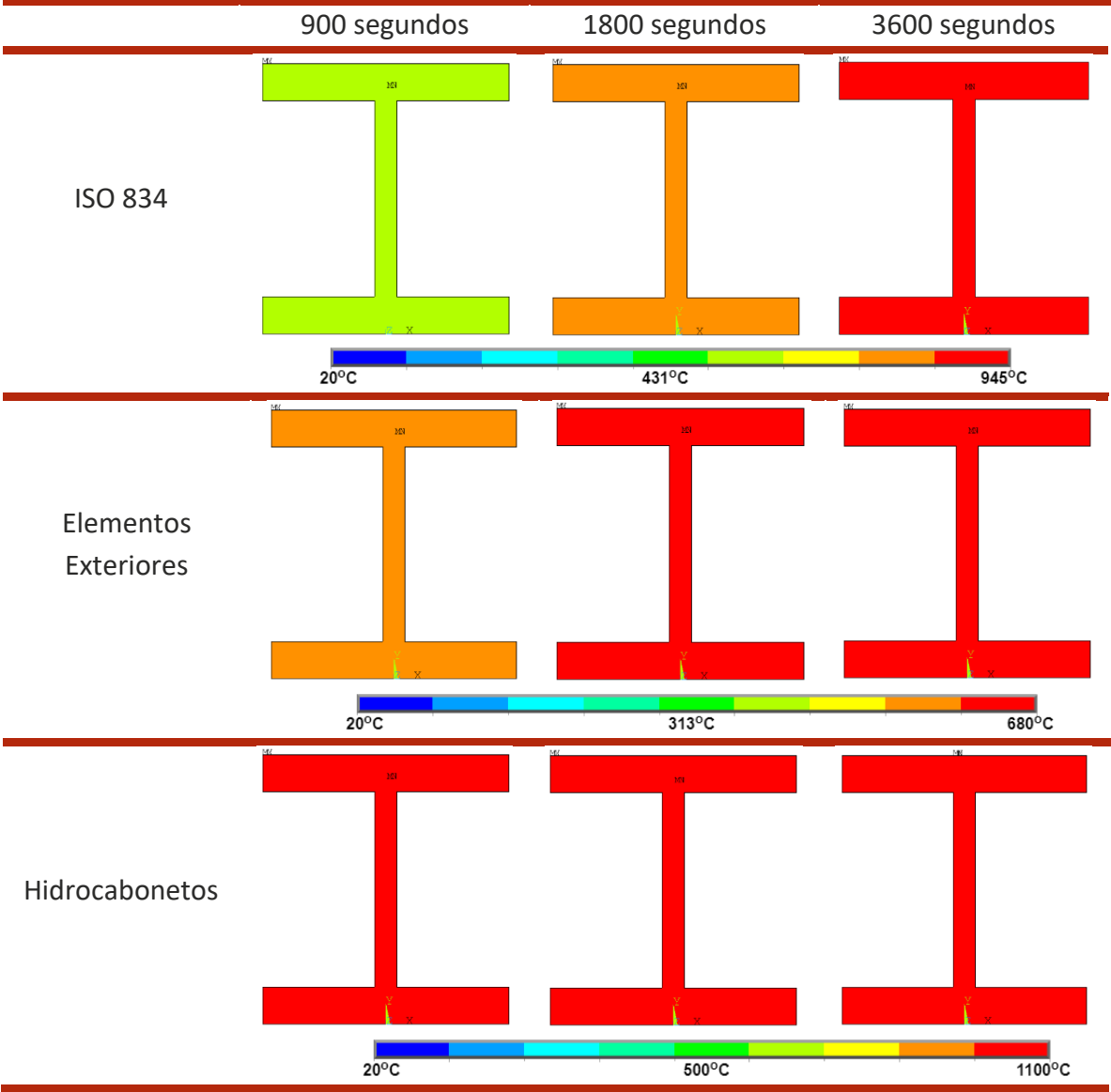
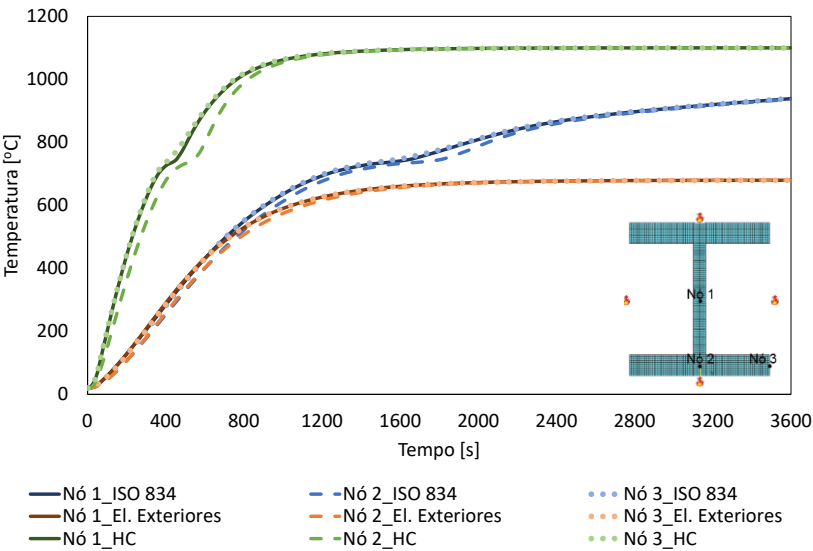
Método Simplificado do Eurocódigo 3



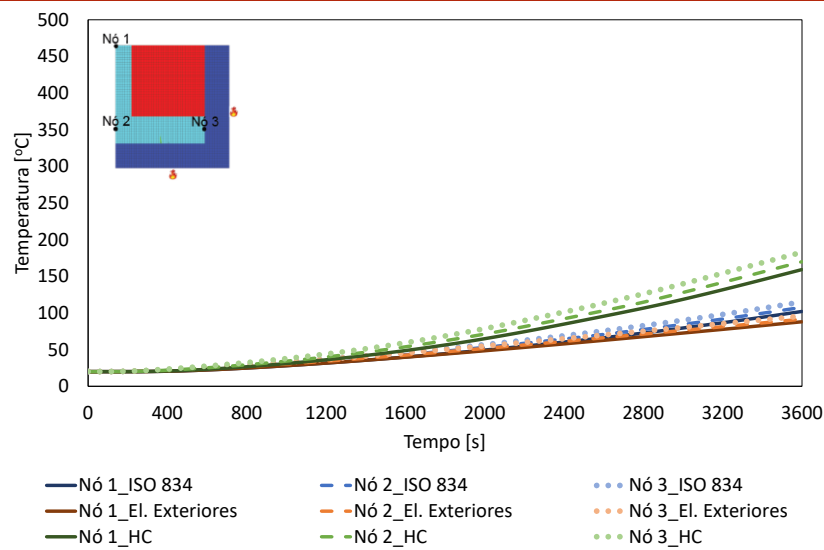
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

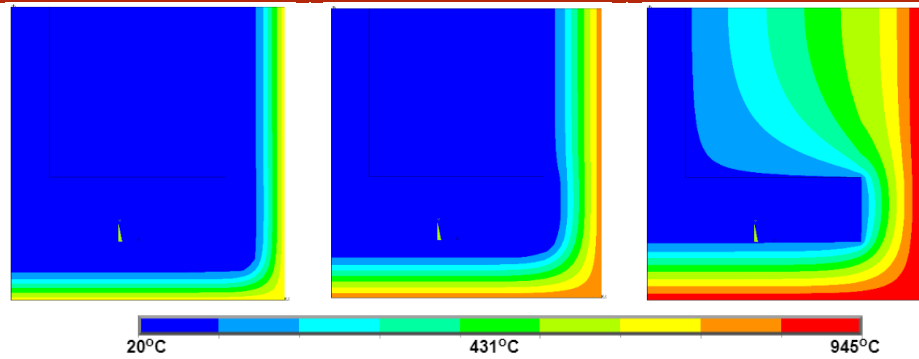


900 segundos

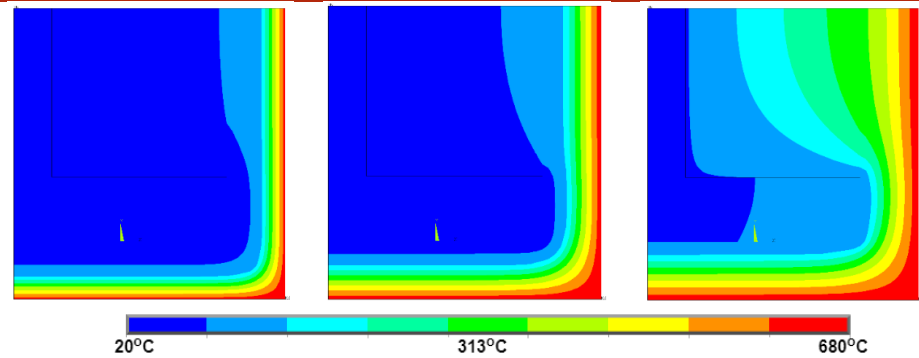
1800 segundos

3600 segundos

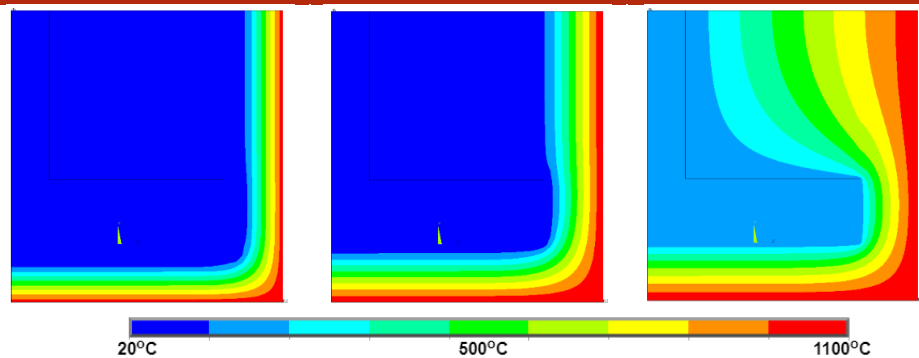
ISO 834



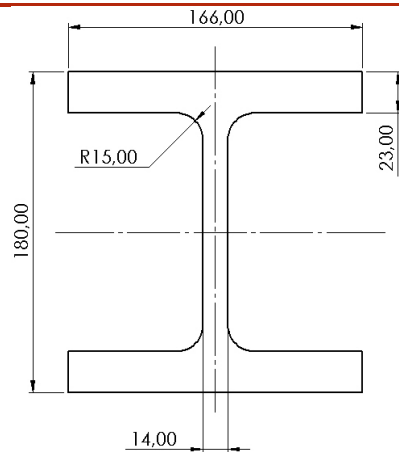
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

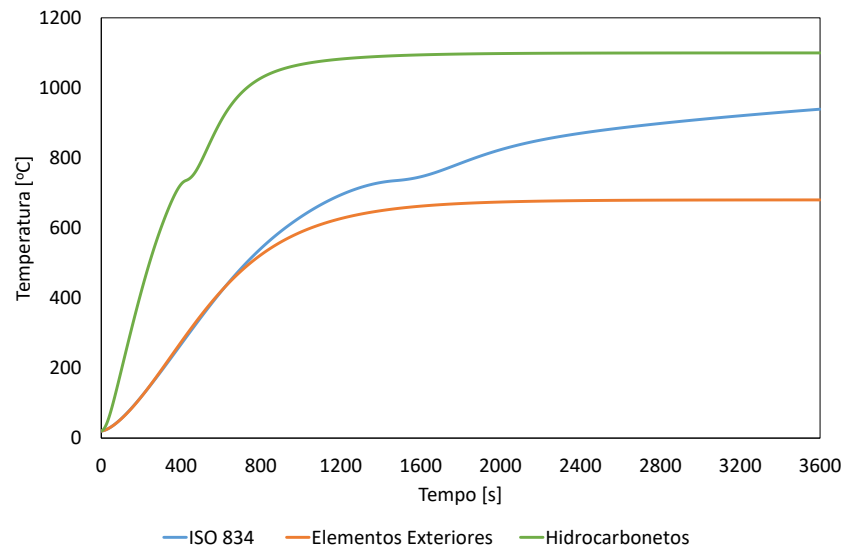


HEM 160

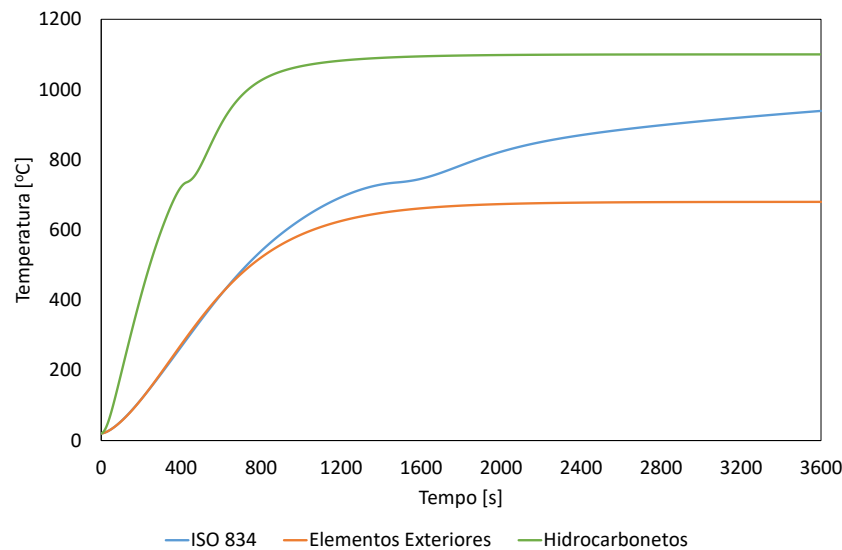


Perímetro [m]	0,9702
Área [m²]	0,009705
Fator de massividade [m ⁻¹]	99,97
Comprimento Característico [m]	0,010

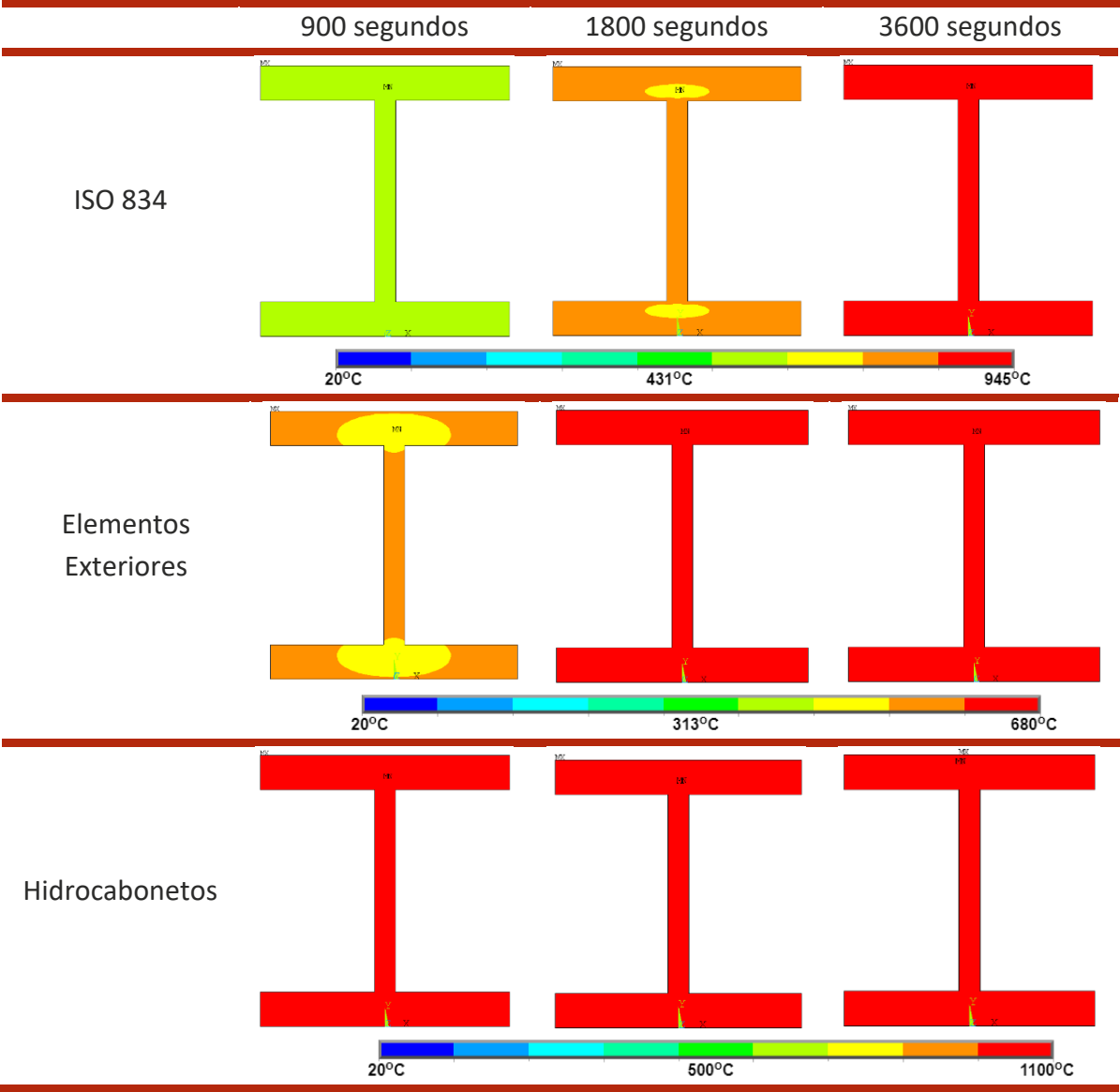
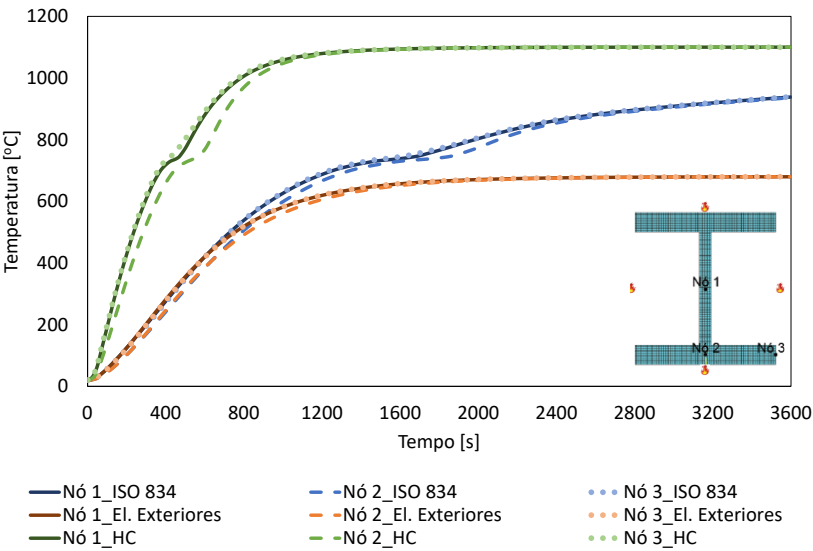
Método Simplificado do Eurocódigo 3



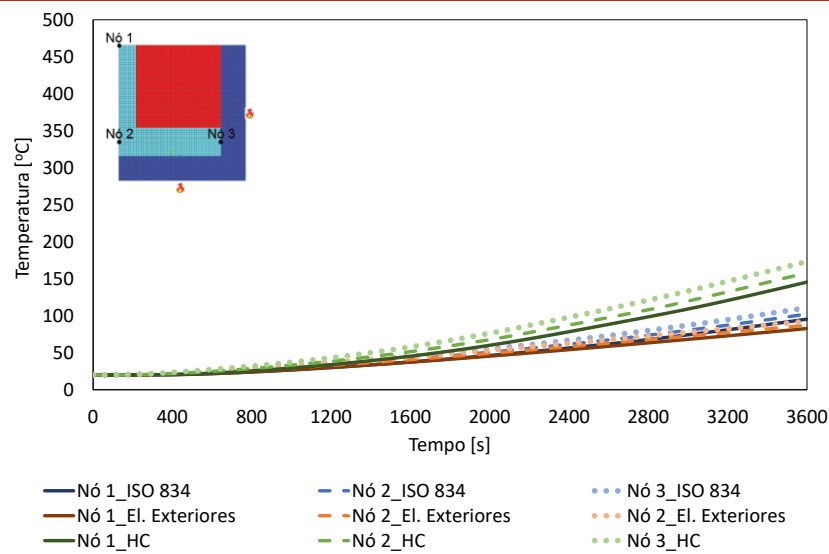
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

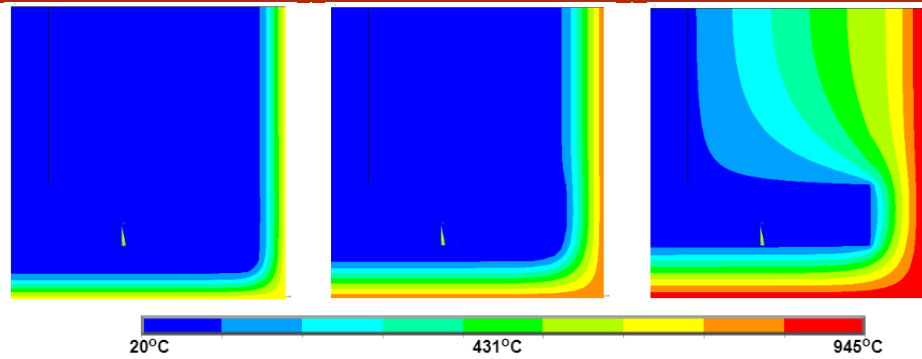


900 segundos

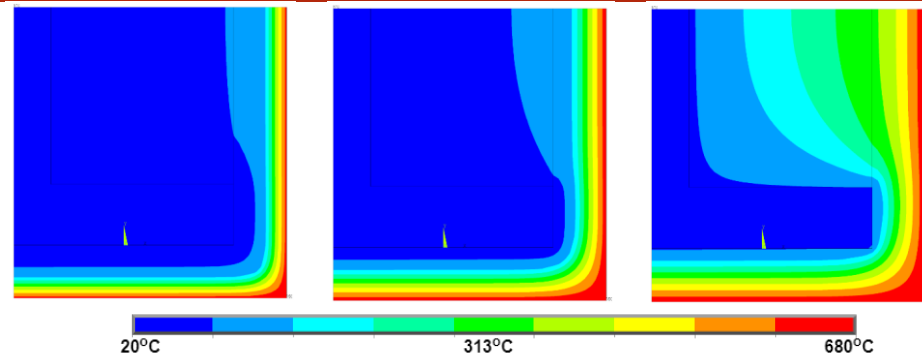
1800 segundos

3600 segundos

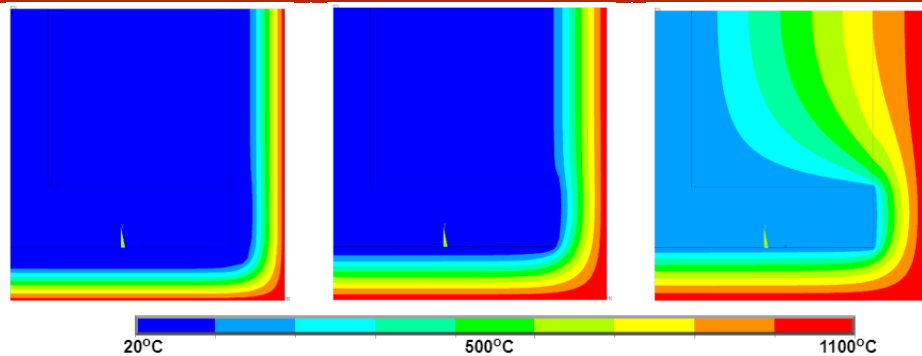
ISO 834



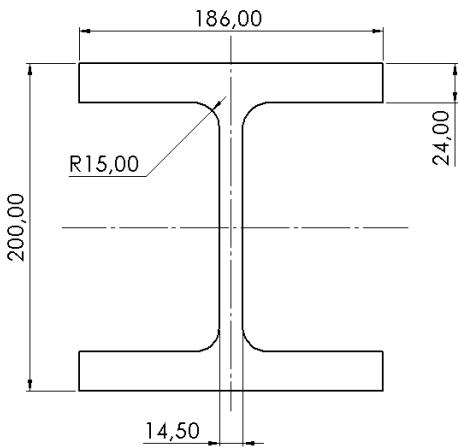
Elementos Exteriores



Hidrocabonetos

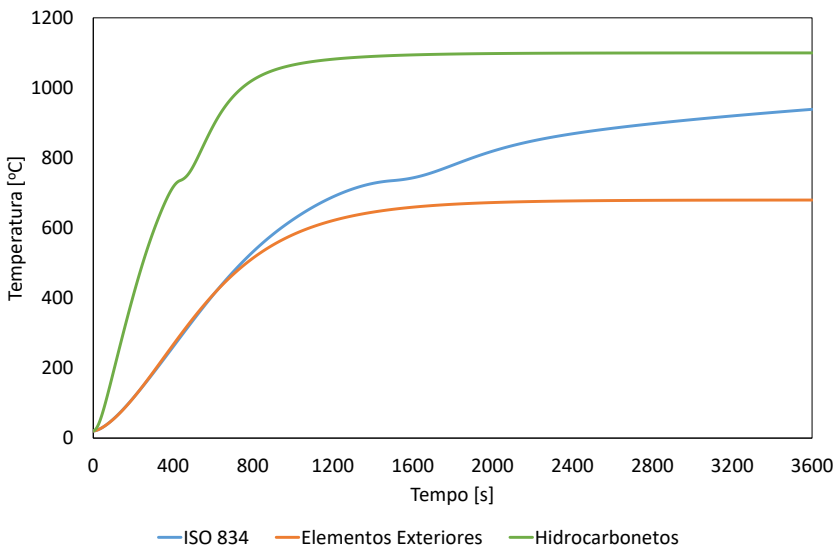


HEM 180

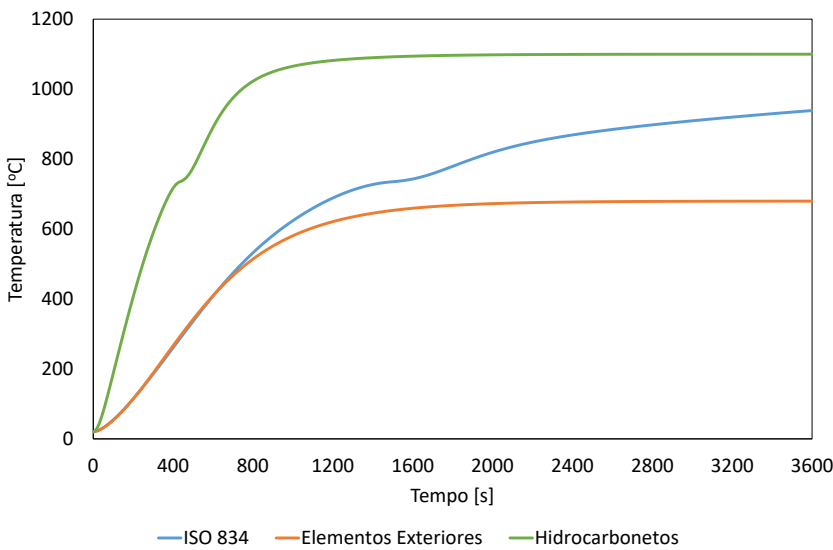


Perímetro [m]	1,0892
Área [m²]	0,01133
Fator de massividade [m ⁻¹]	96,13
Comprimento Característico [m]	0,011

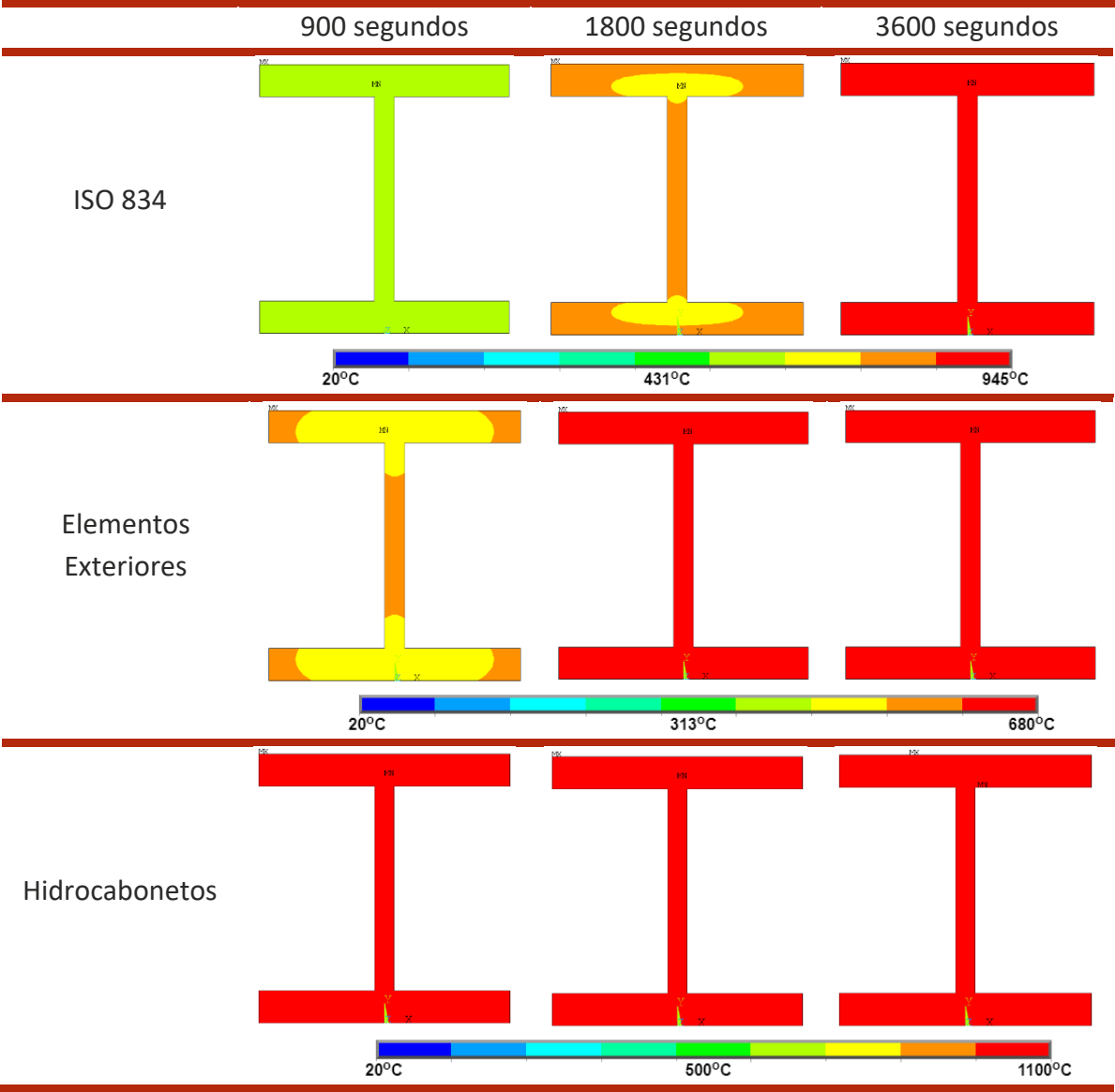
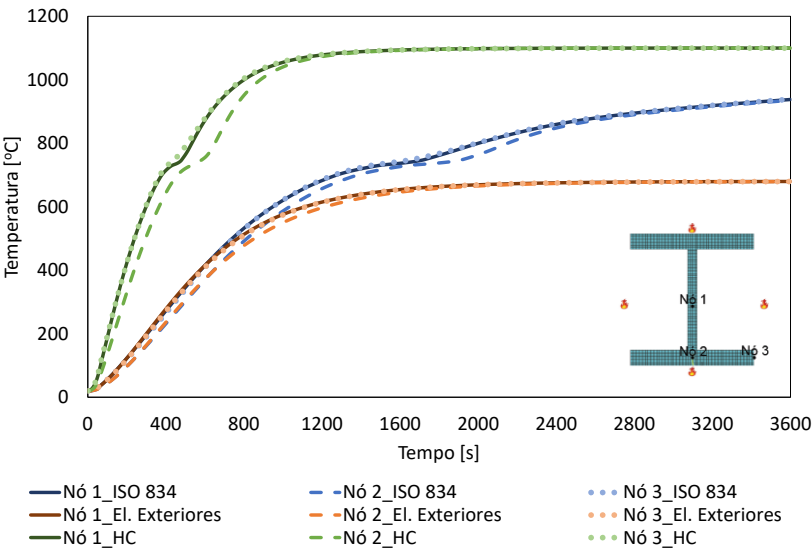
Método Simplificado do Eurocódigo 3



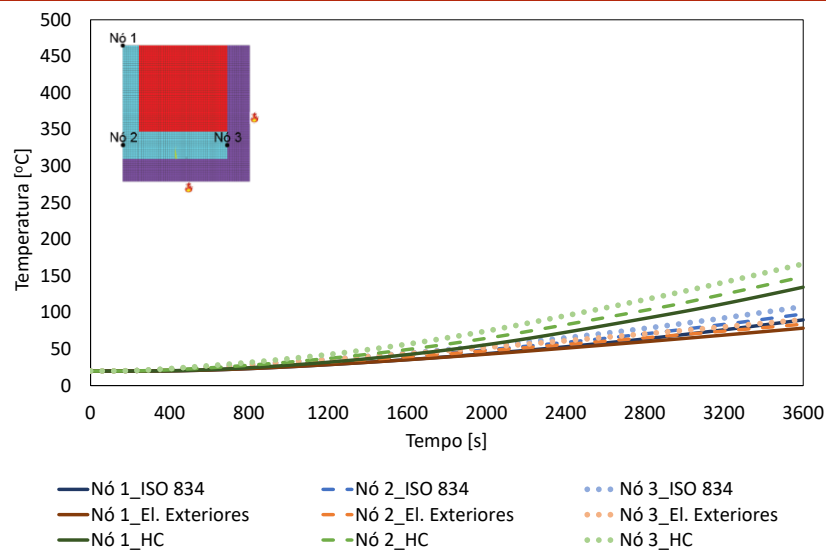
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

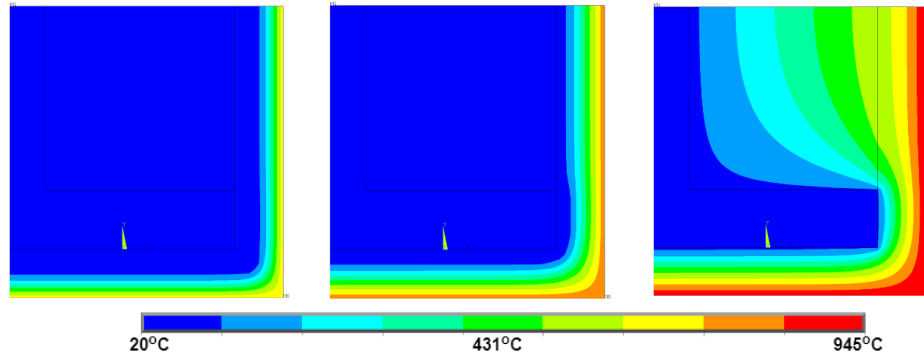


900 segundos

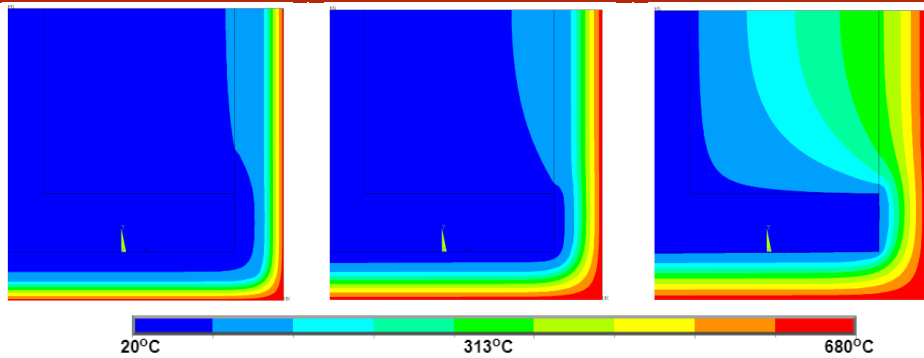
1800 segundos

3600 segundos

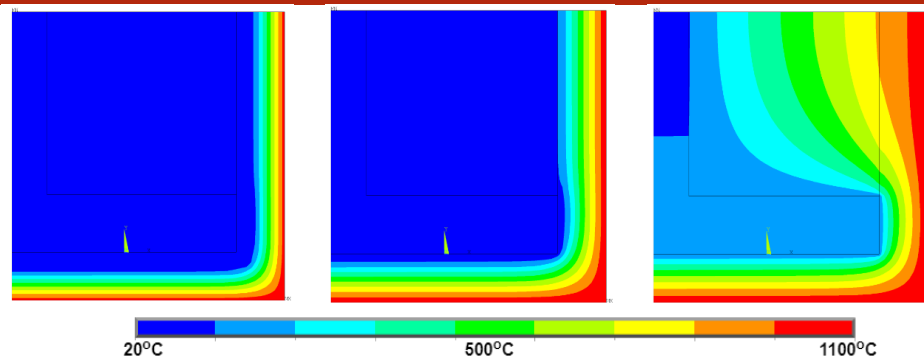
ISO 834



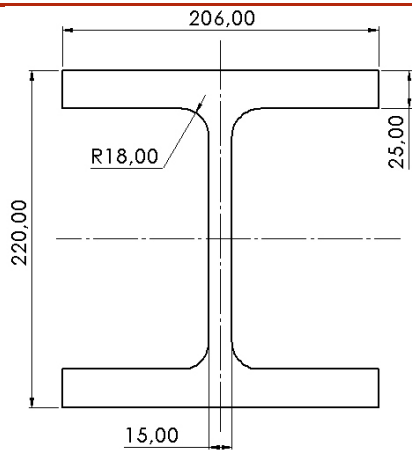
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

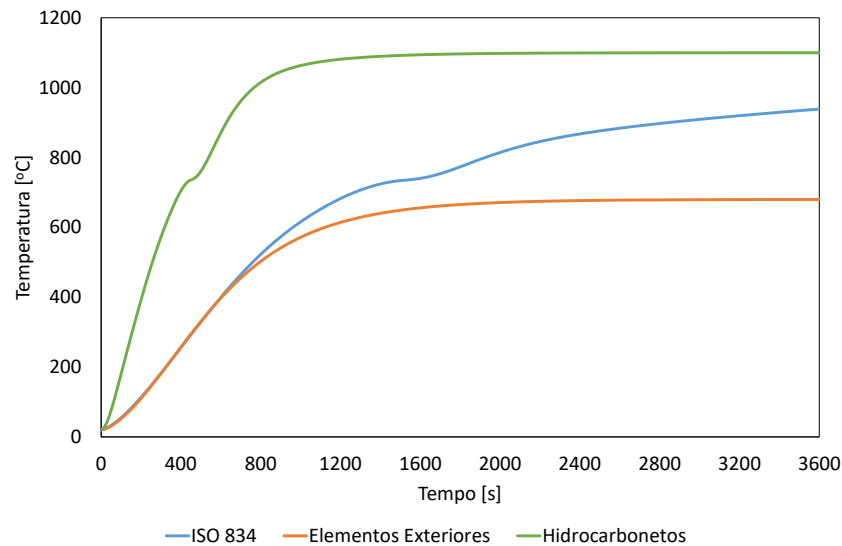


HEM 200

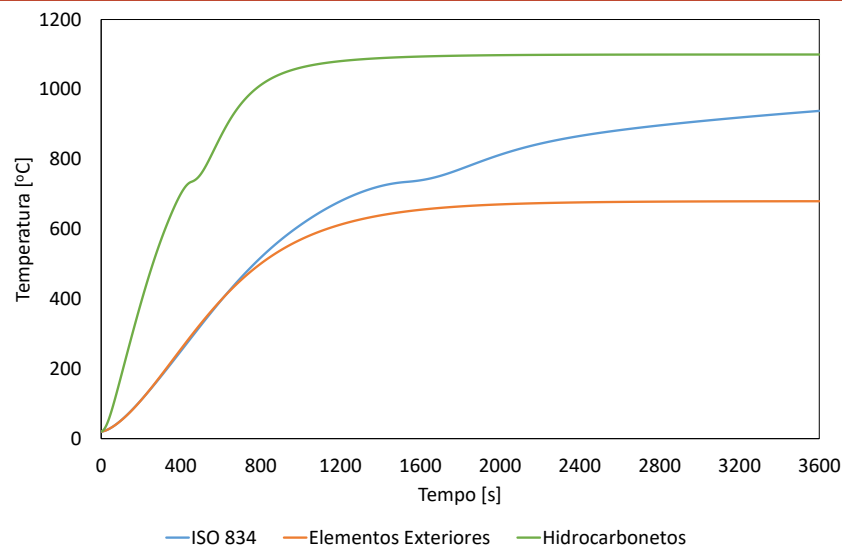


Perímetro [m]	1,2031
Área [m²]	0,01313
Fator de massividade [m ⁻¹]	91,63
Comprimento Característico [m]	0,011

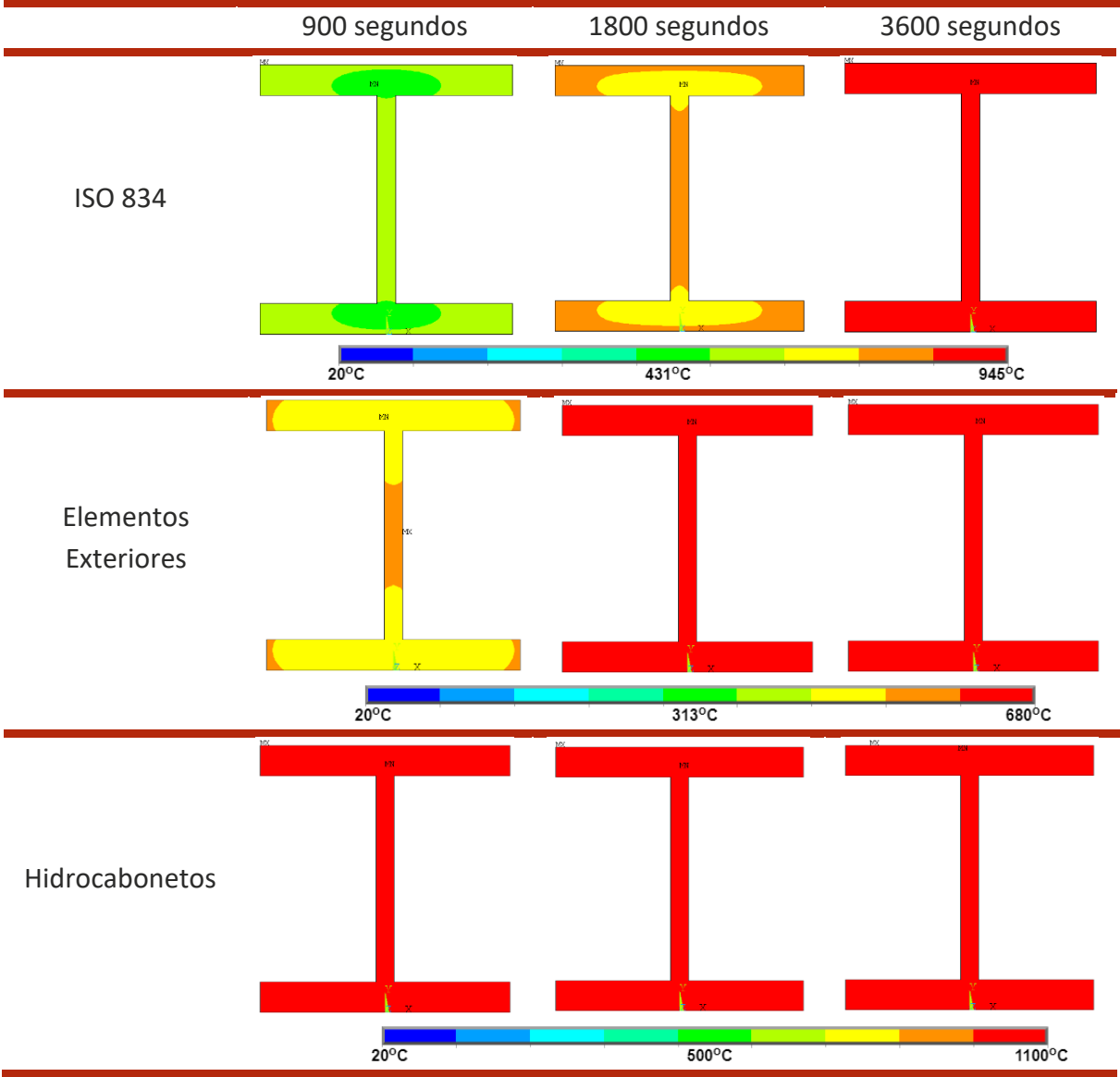
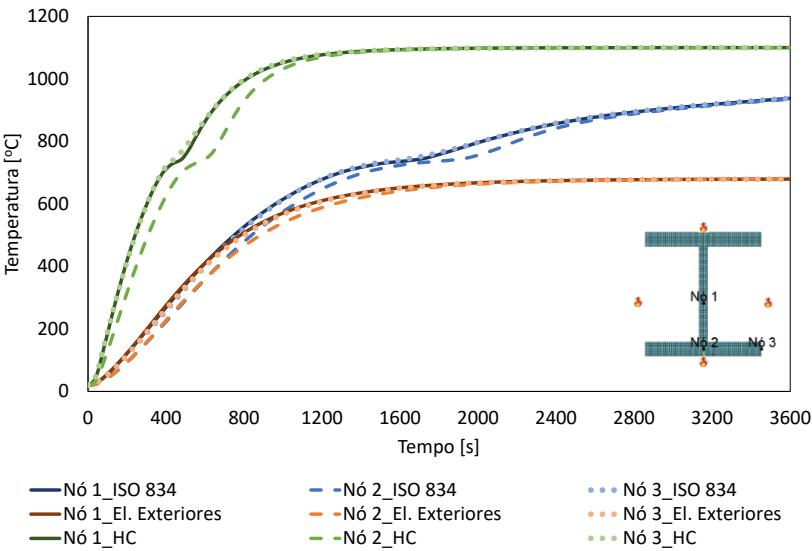
Método Simplificado do Eurocódigo 3



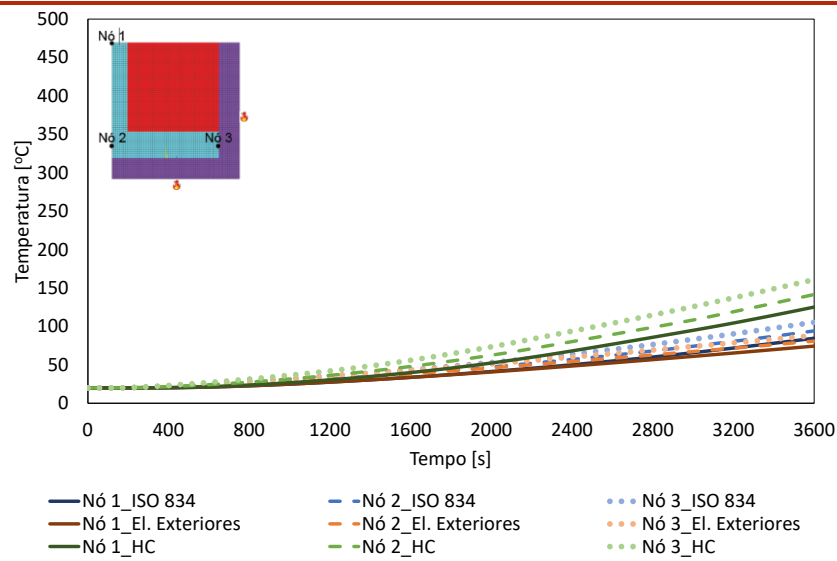
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

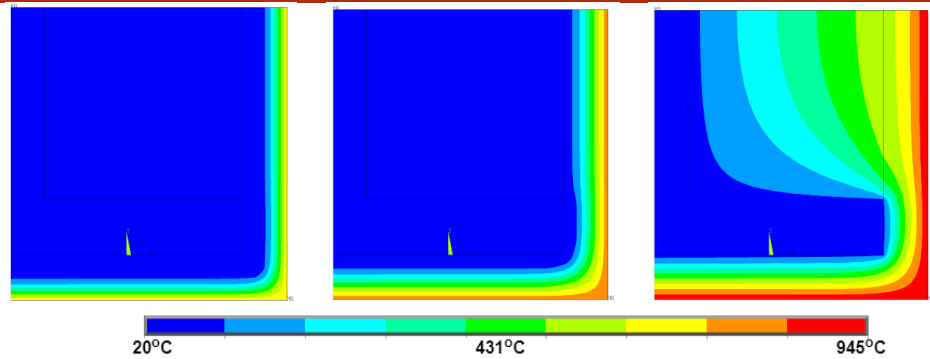


900 segundos

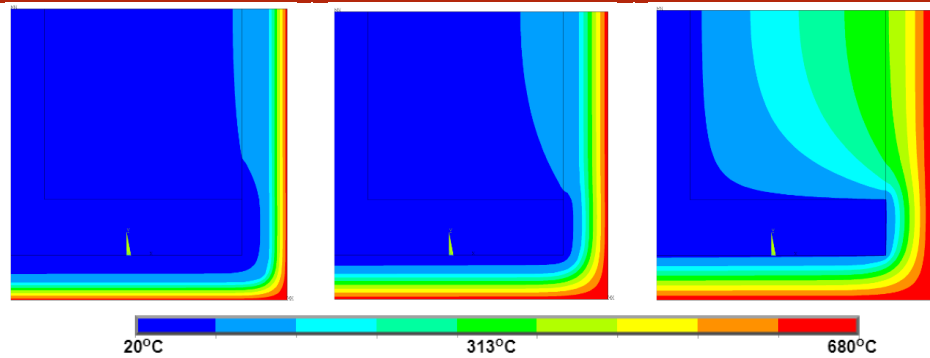
1800 segundos

3600 segundos

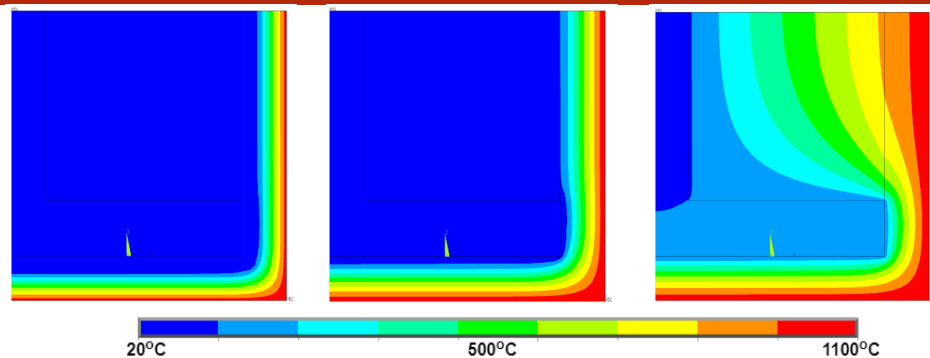
ISO 834



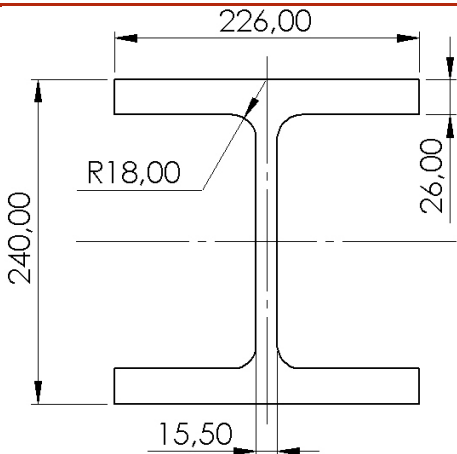
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

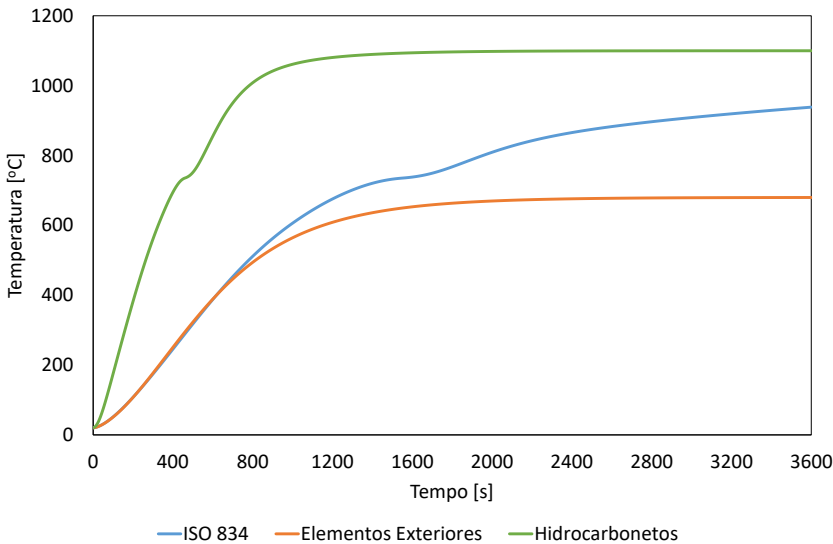


HEM 220

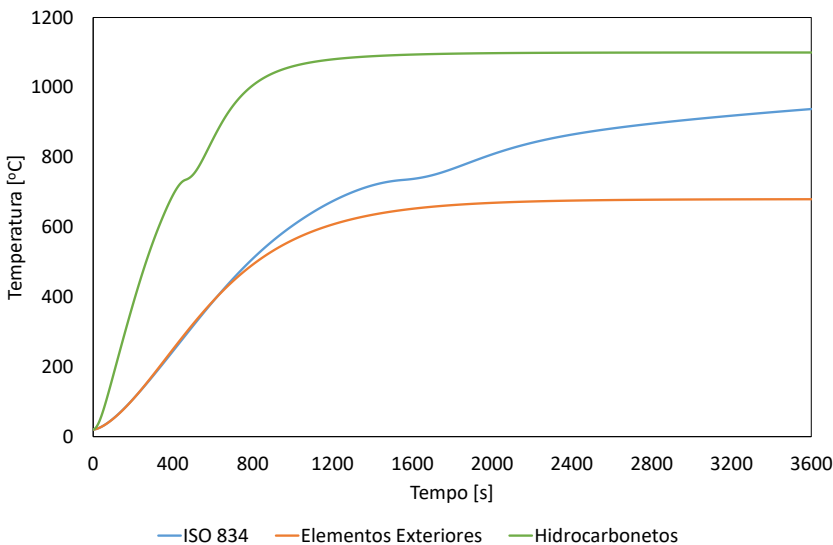


Perímetro [m]	1,3221
Área [m²]	0,01494
Fator de massividade [m ⁻¹]	88,49
Comprimento Característico [m]	0,0113

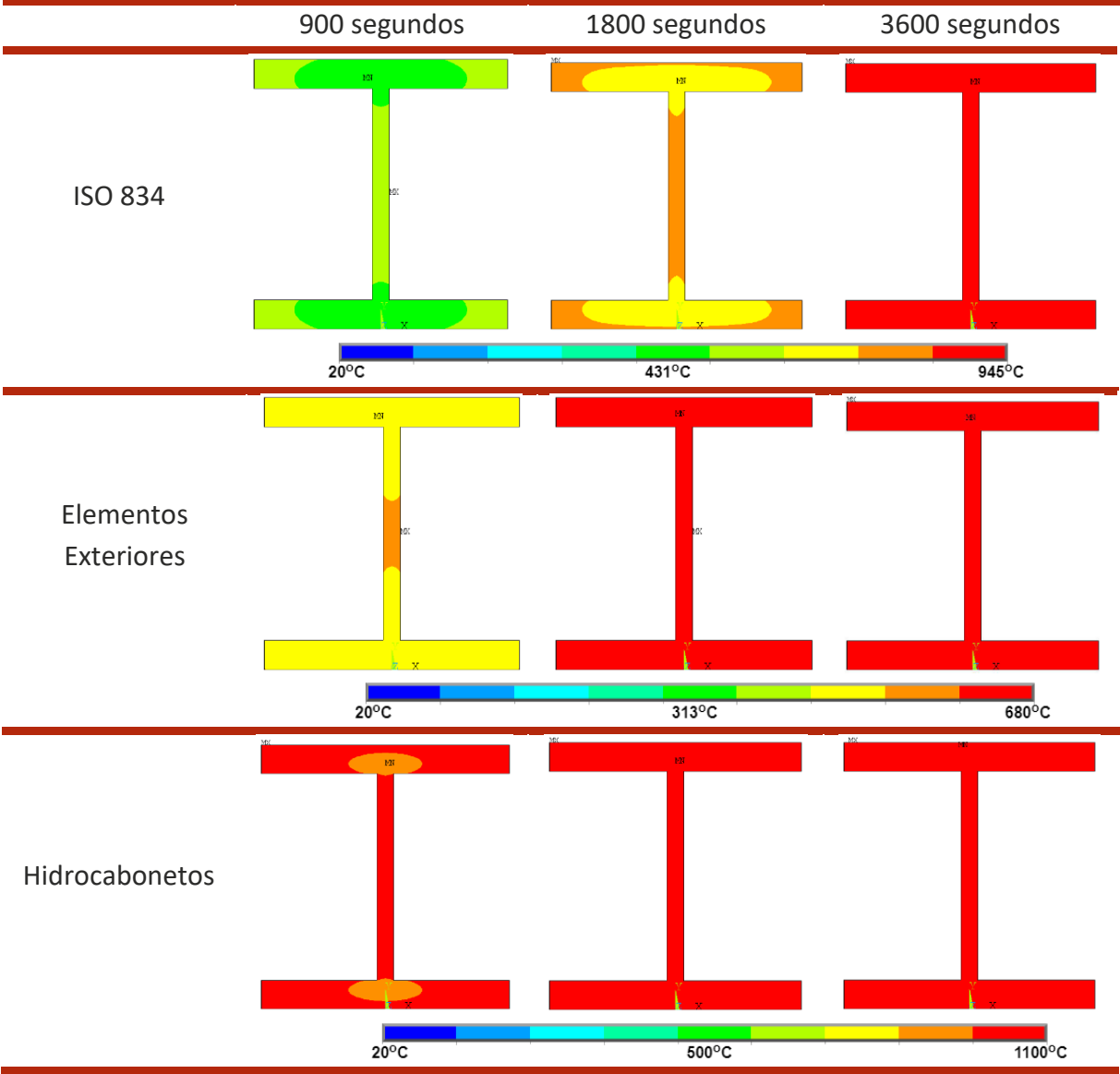
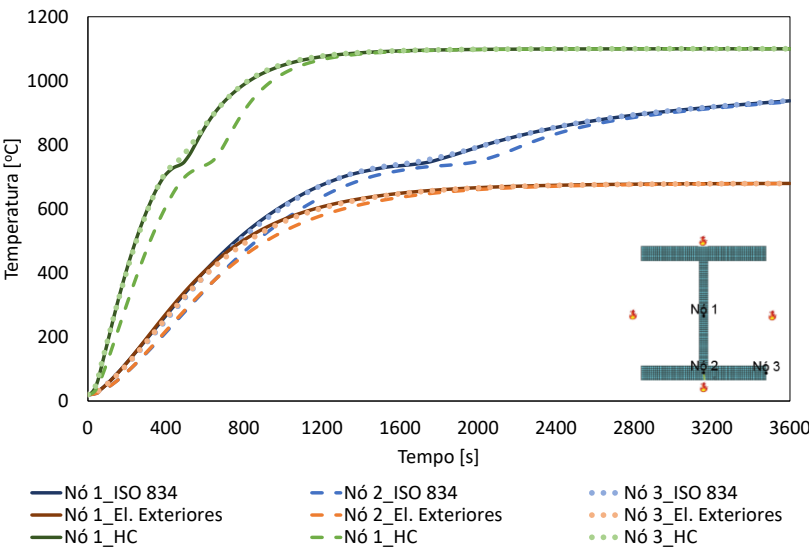
Método Simplificado do Eurocódigo 3



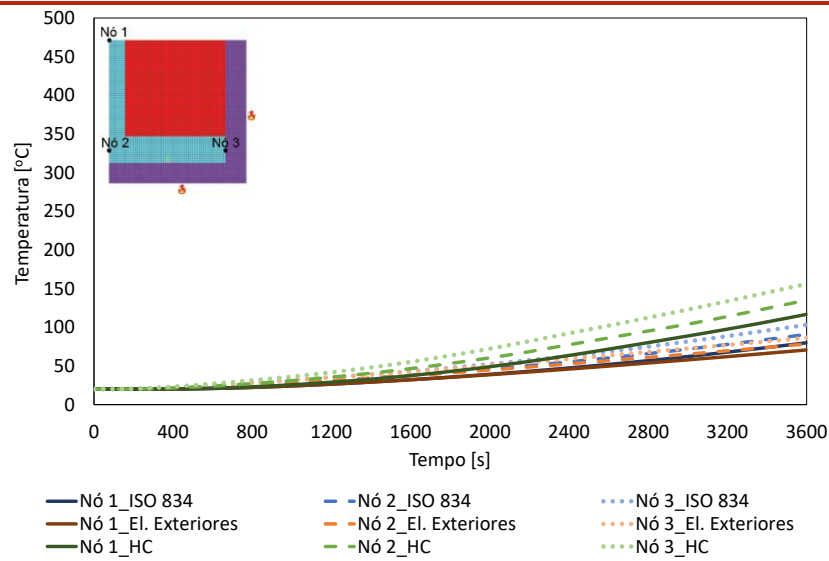
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

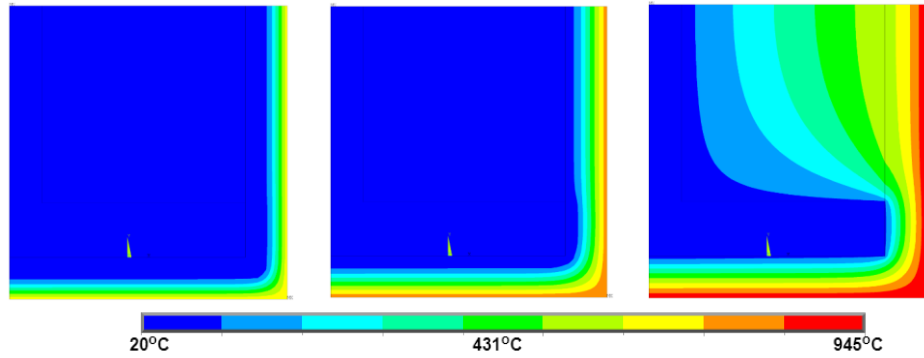


900 segundos

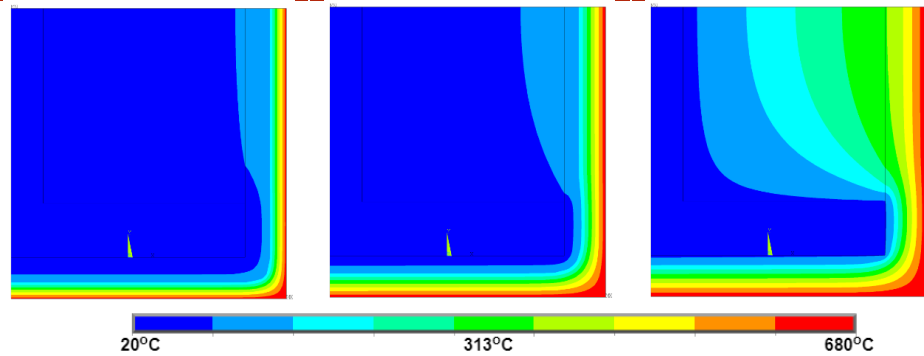
1800 segundos

3600 segundos

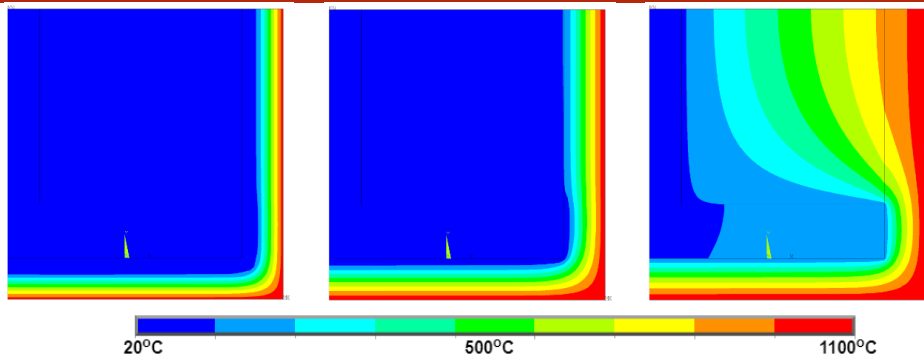
ISO 834



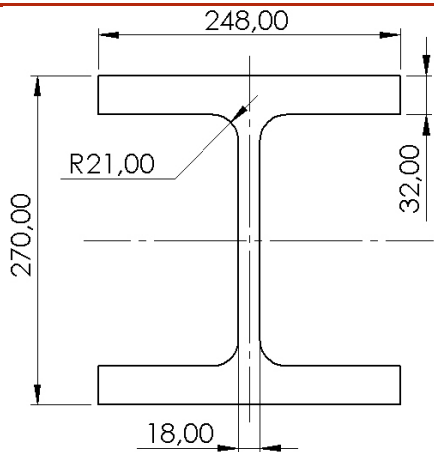
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

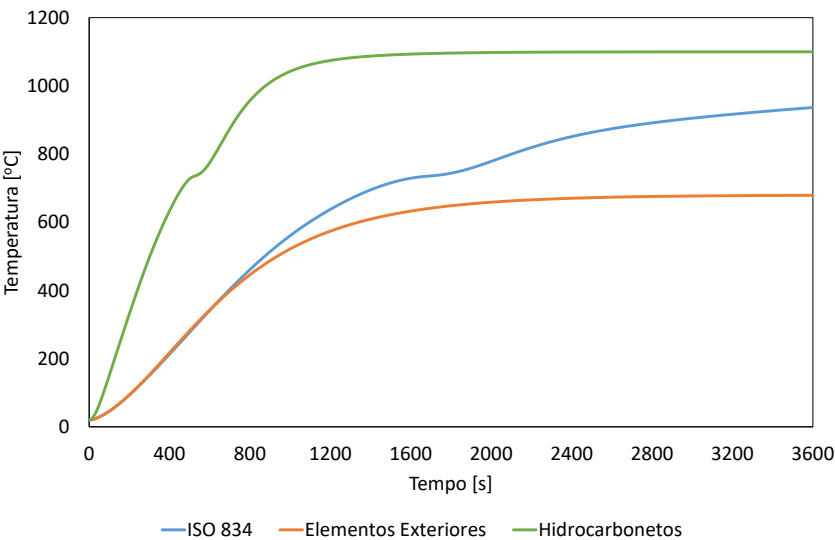


HEM 240

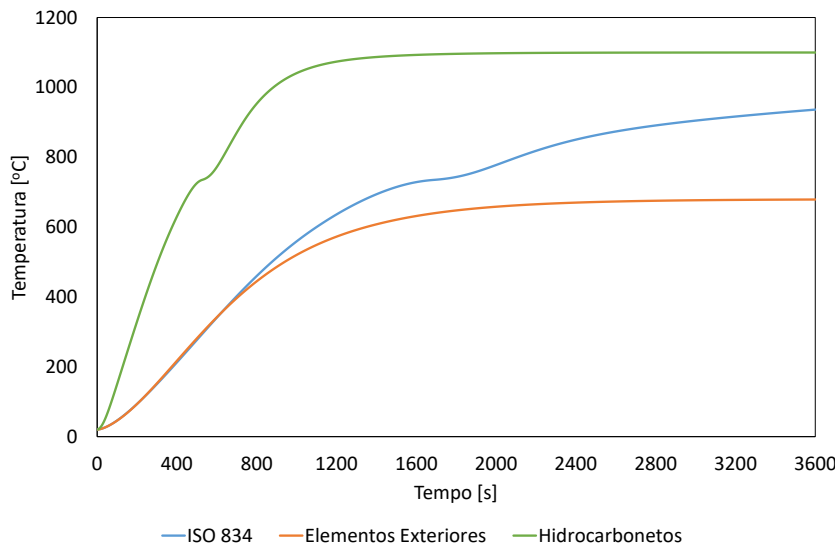


Perímetro [m]	1,4599
Área [m²]	0,01996
Fator de massividade [m ⁻¹]	73,14
Comprimento Característico [m]	0,0136

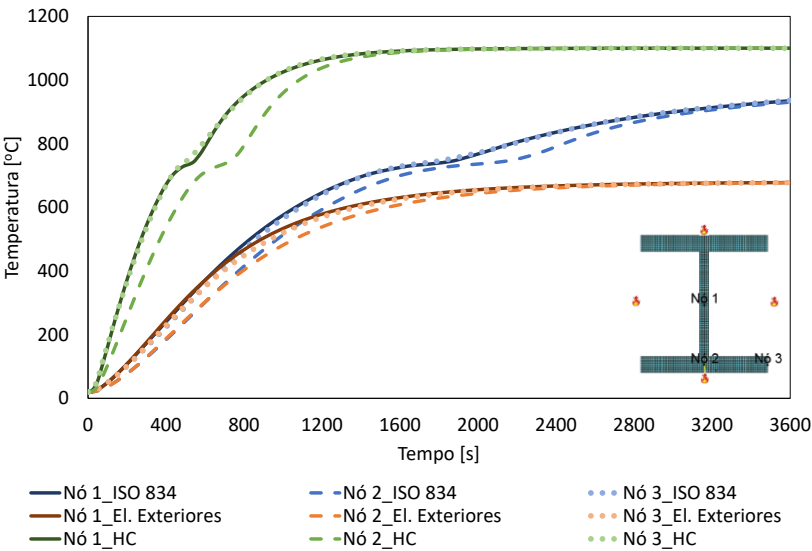
Método Simplificado do Eurocódigo 3



Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)

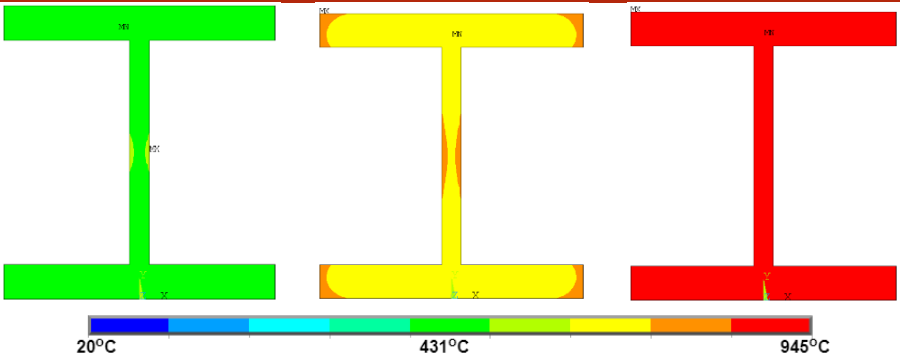


900 segundos

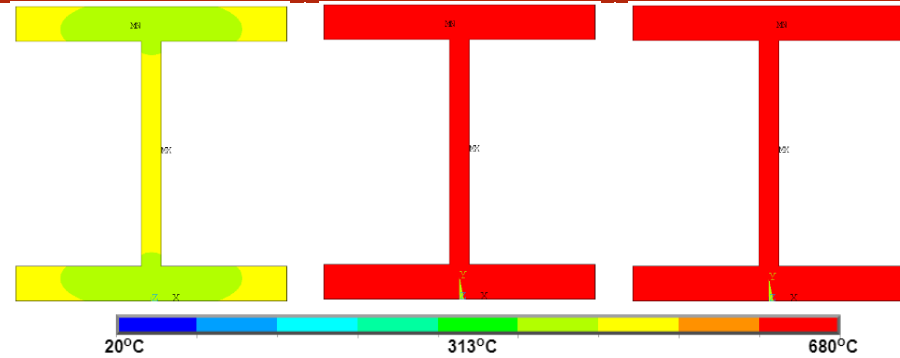
1800 segundos

3600 segundos

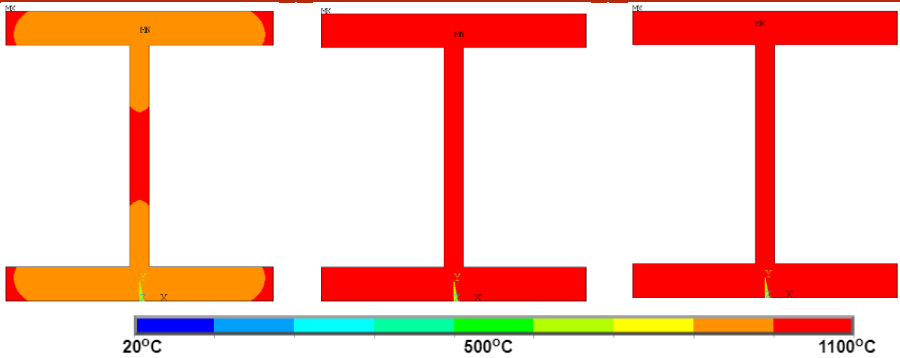
ISO 834



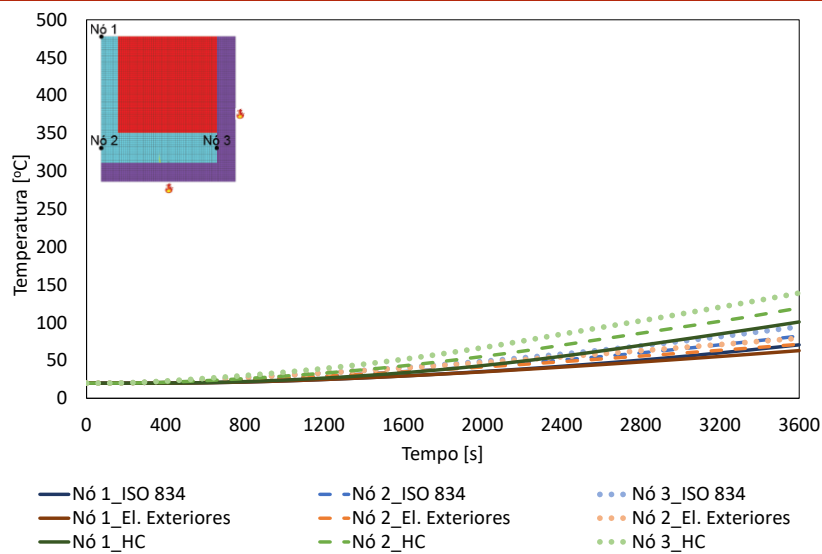
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos



Método Numérico (Perfil Protegido)

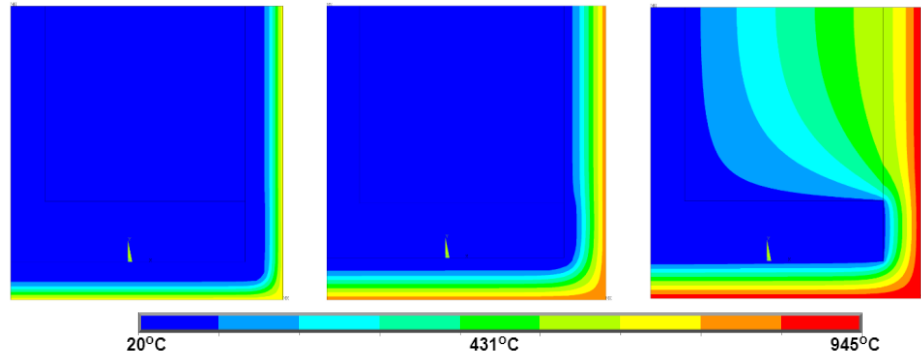


900 segundos

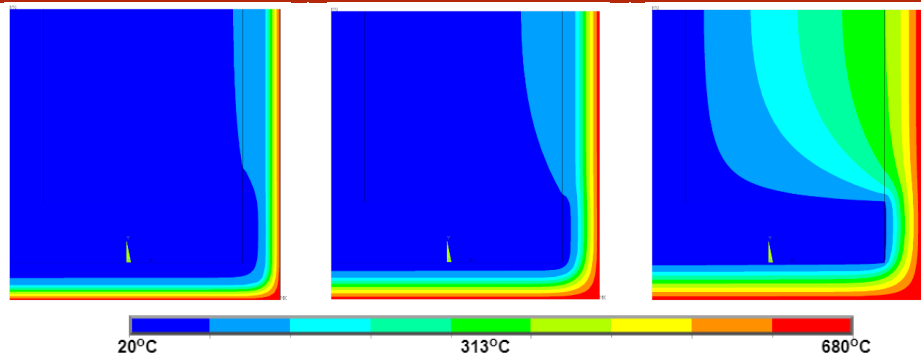
1800 segundos

3600 segundos

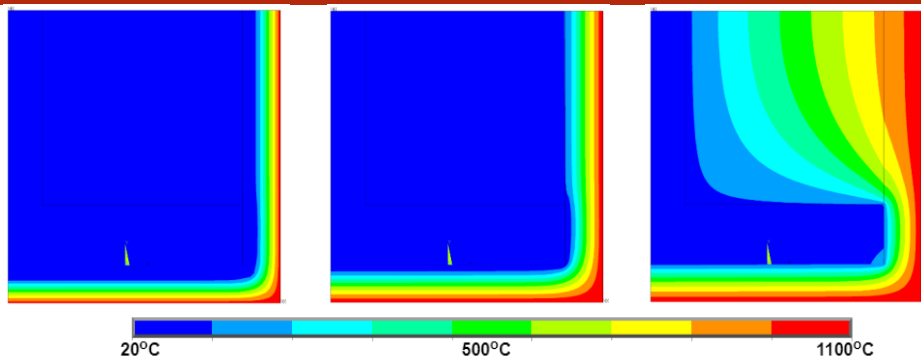
ISO 834



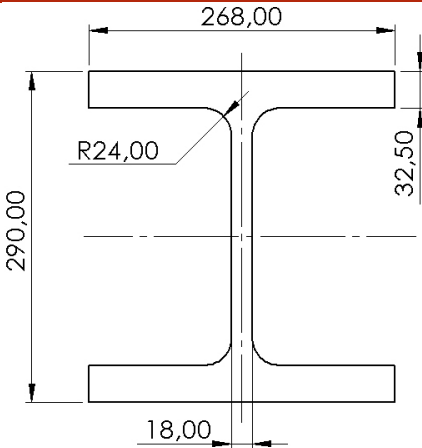
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

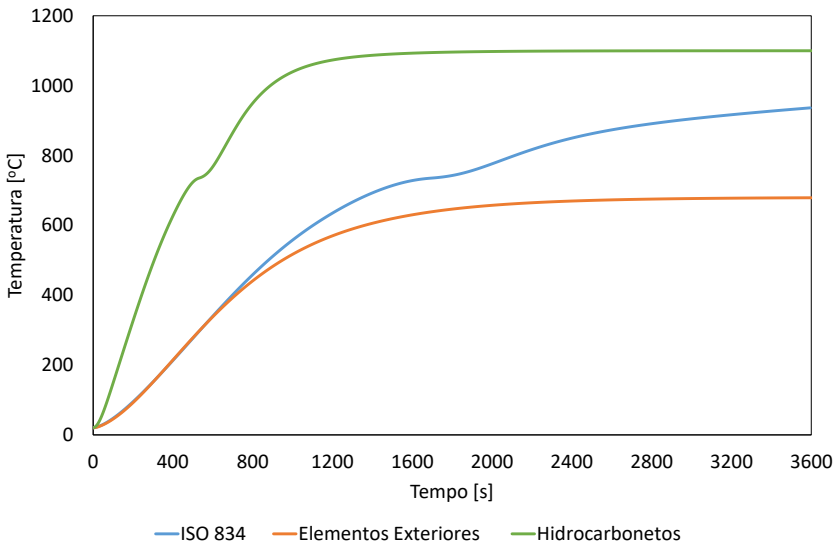


HEM 260

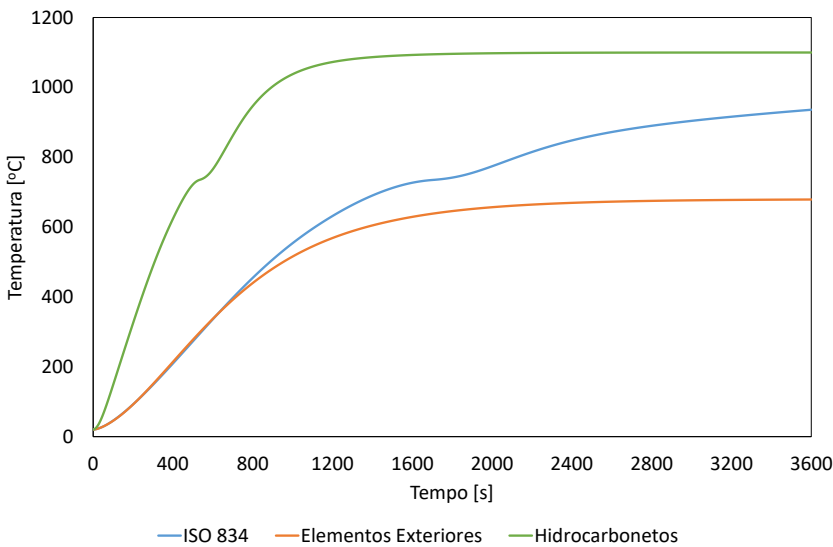


Perímetro [m]	1,5747
Área [m²]	0,02129
Fator de massividade [m ⁻¹]	71,71
Comprimento Característico [m]	0,014

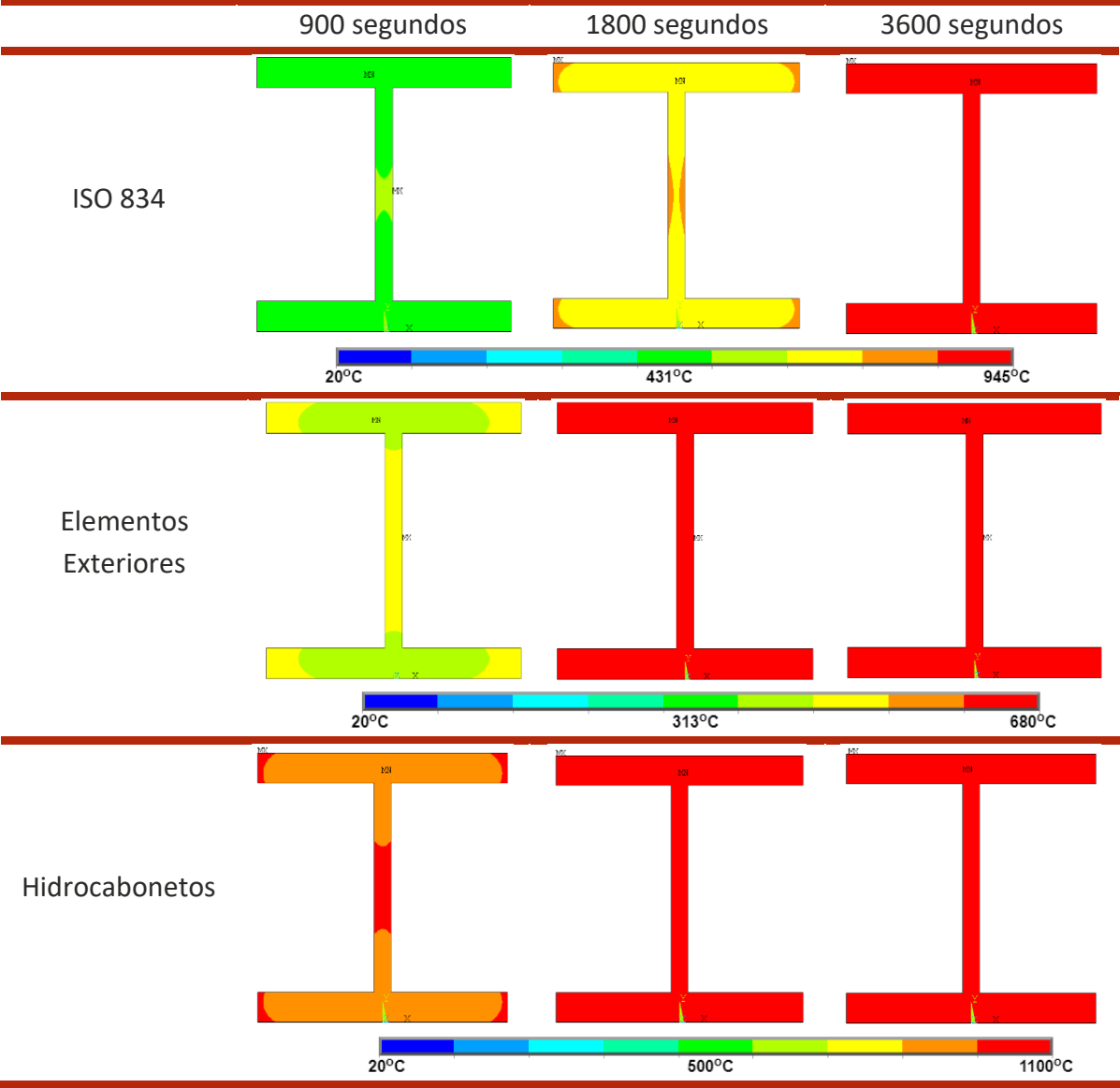
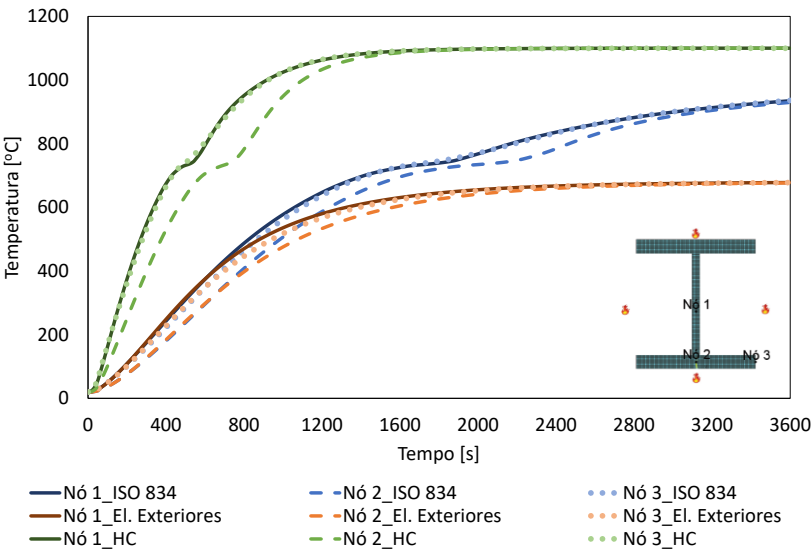
Método Simplificado do Eurocódigo 3



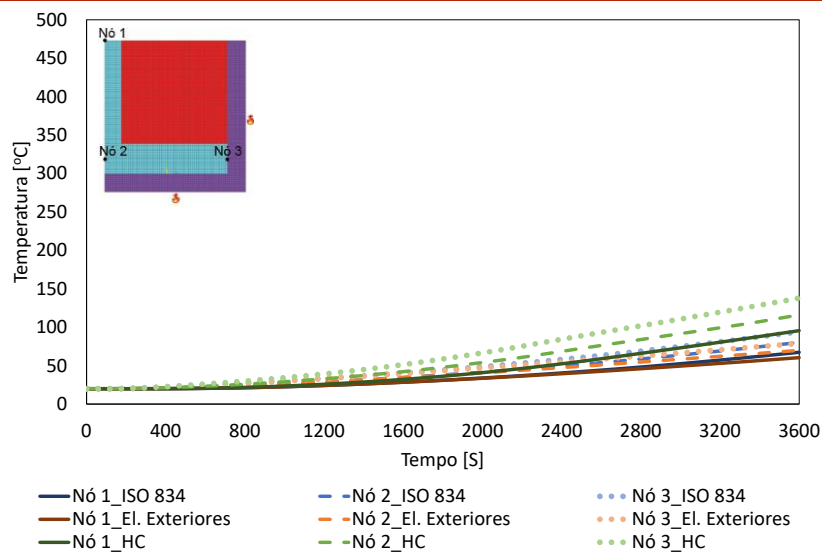
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

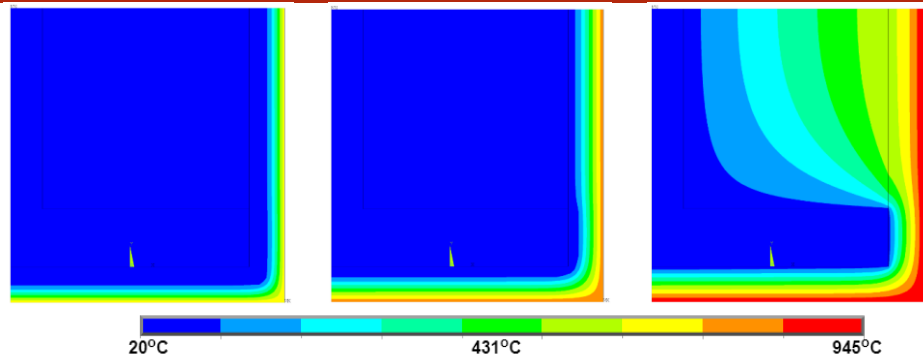


900 segundos

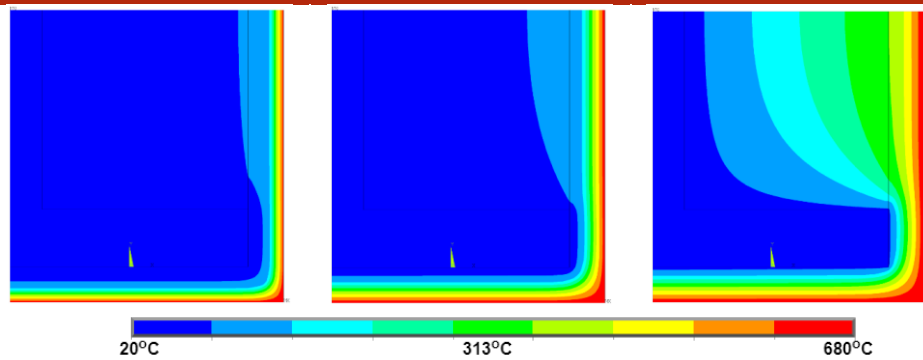
1800 segundos

3600 segundos

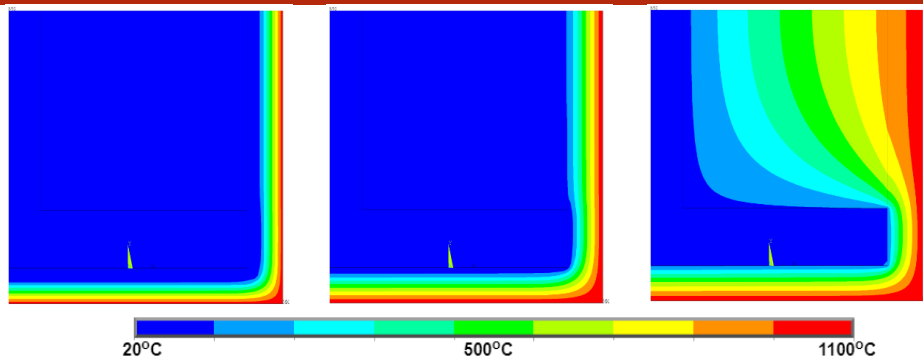
ISO 834



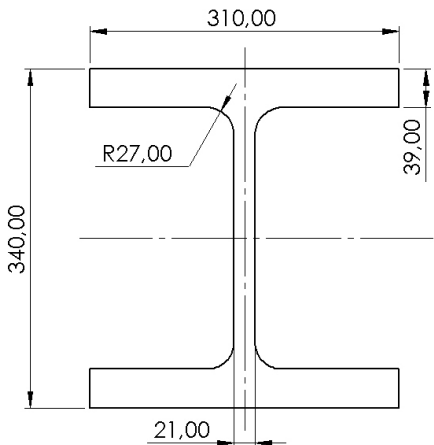
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

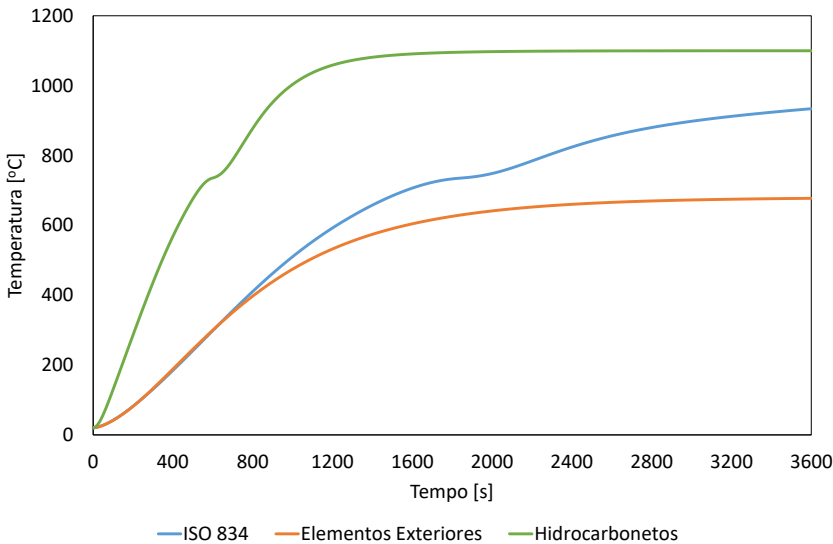


HEM 300

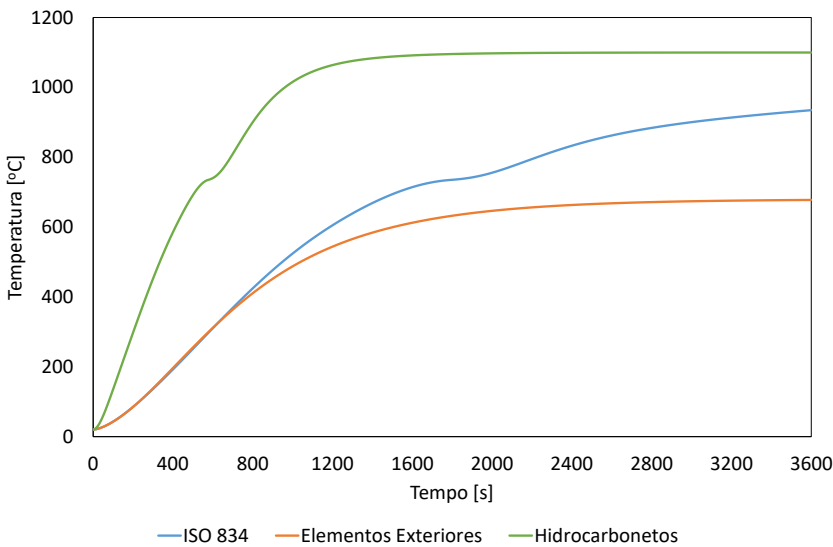


Perímetro [m]	1,9396
Área [m²]	0,03031
Fator de massividade [m ⁻¹]	63,99
Comprimento Característico [m]	0,015

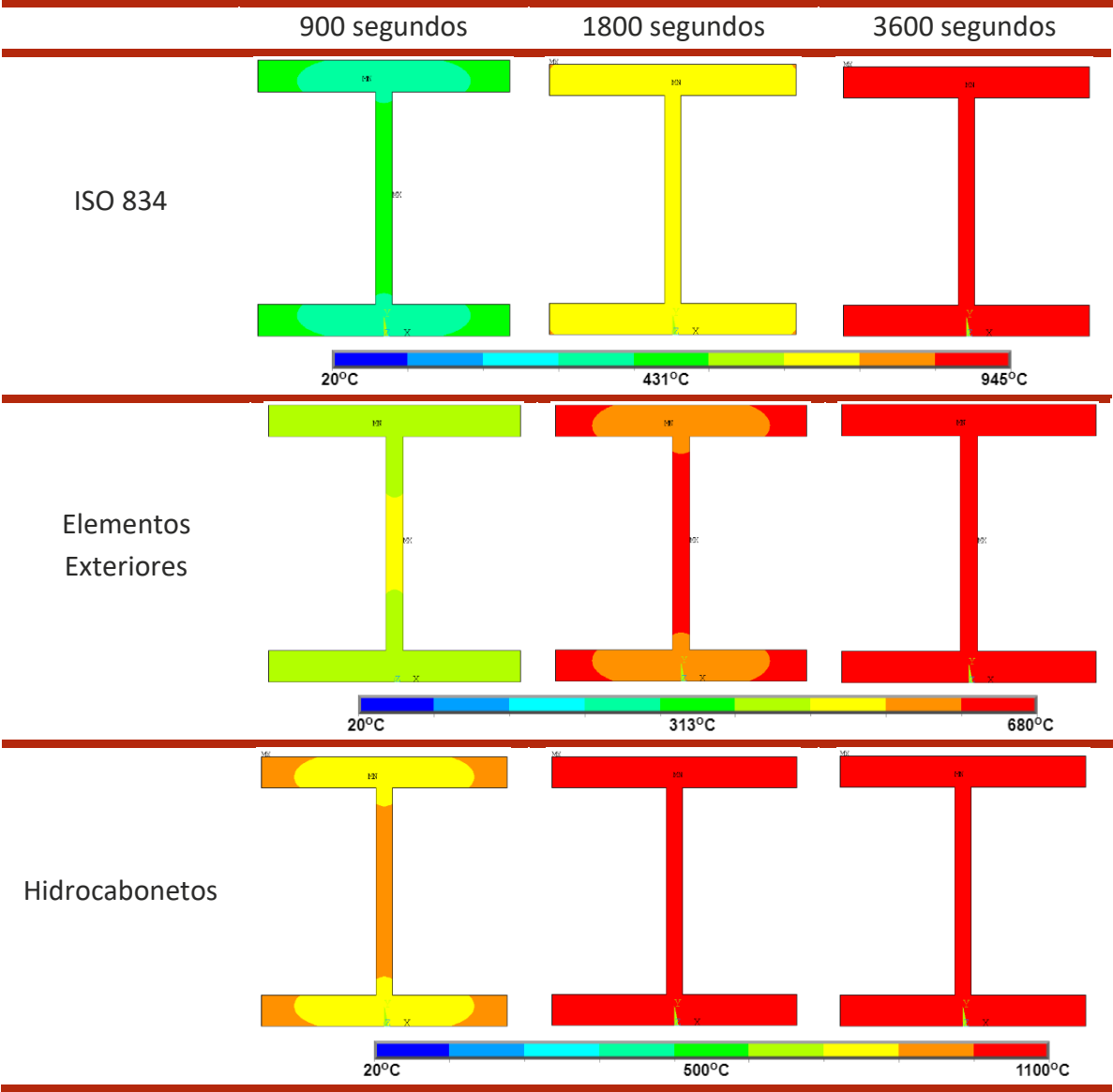
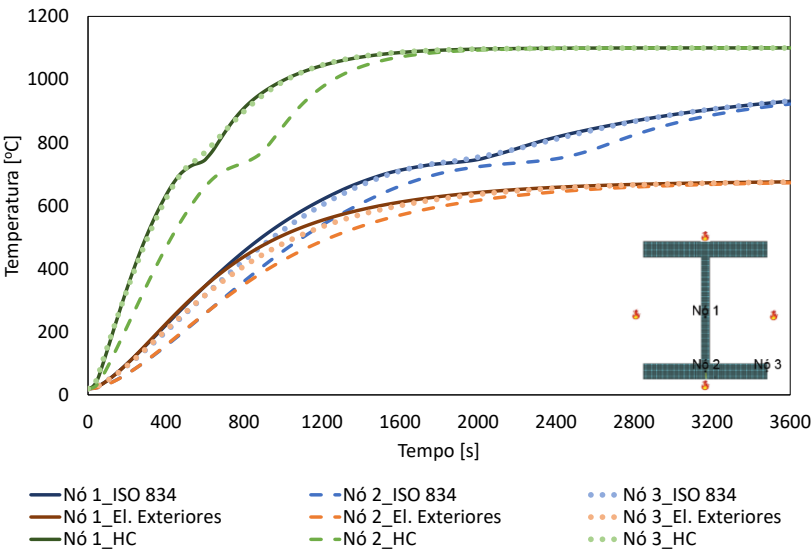
Método Simplificado do Eurocódigo 3



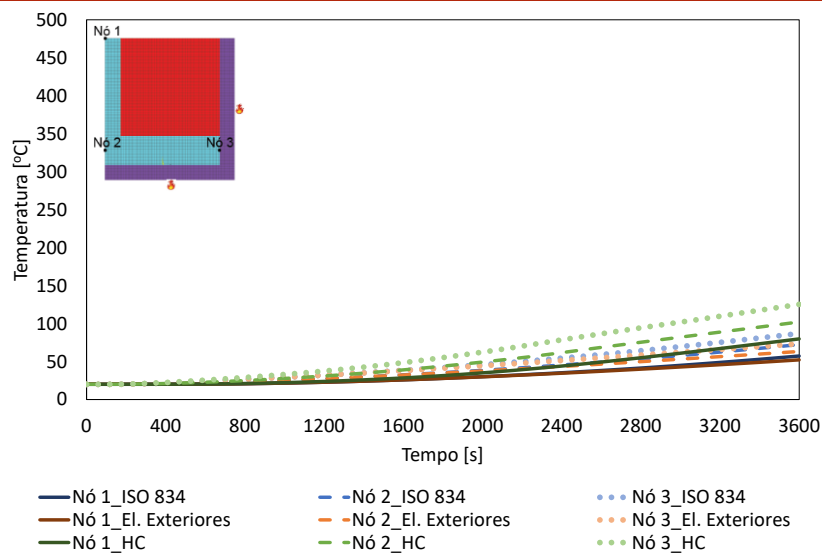
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

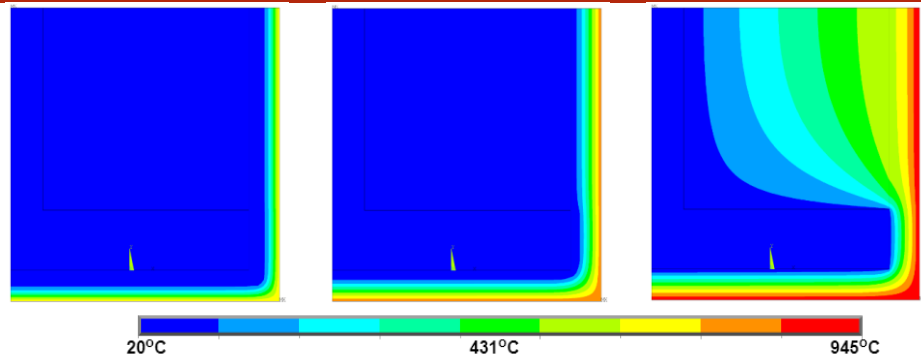


900 segundos

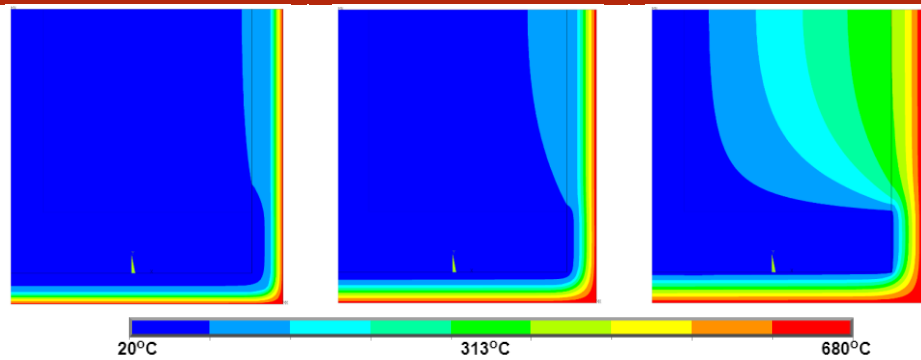
1800 segundos

3600 segundos

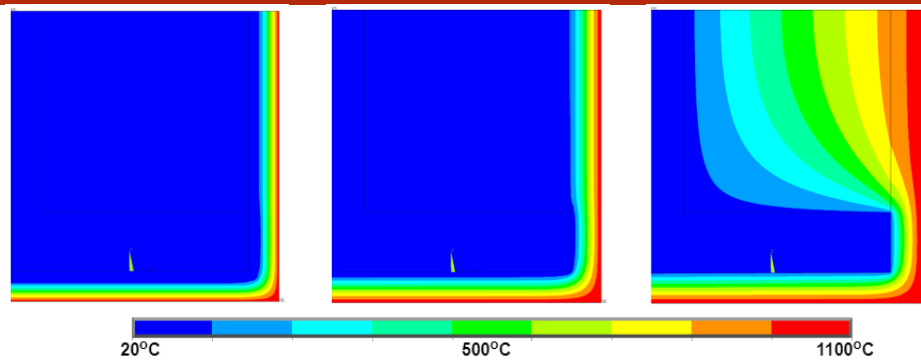
ISO 834



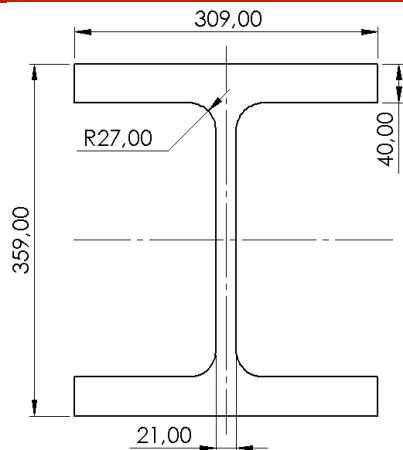
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

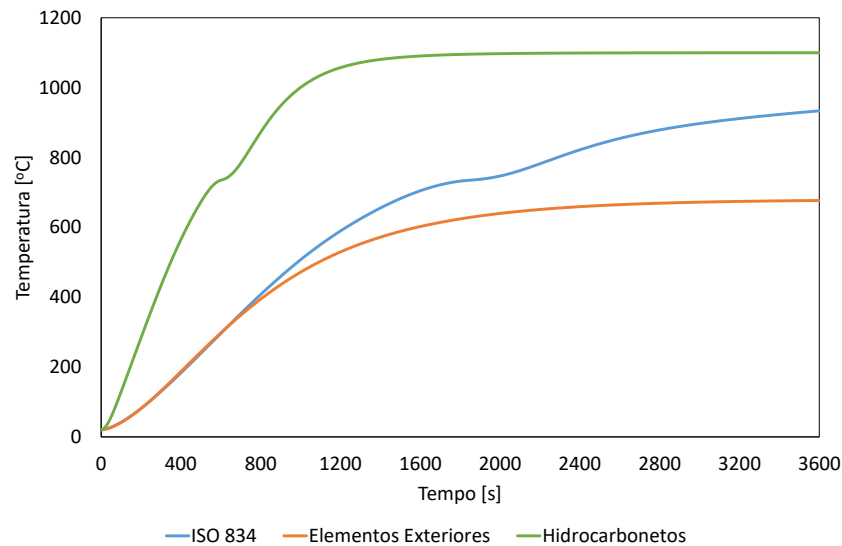


HEM 320

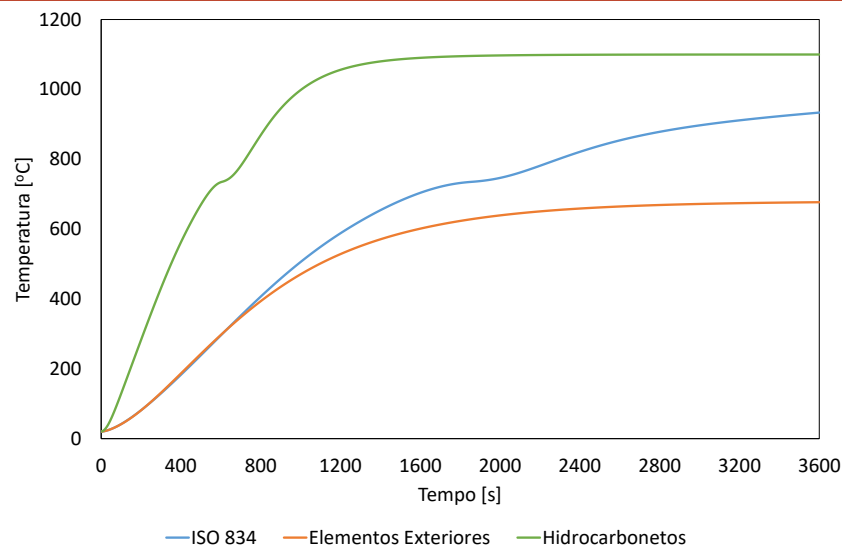


Perímetro [m]	1,8656
Área [m²]	0,0312
Fator de massividade [m ⁻¹]	59,79
Comprimento Característico [m]	0,016

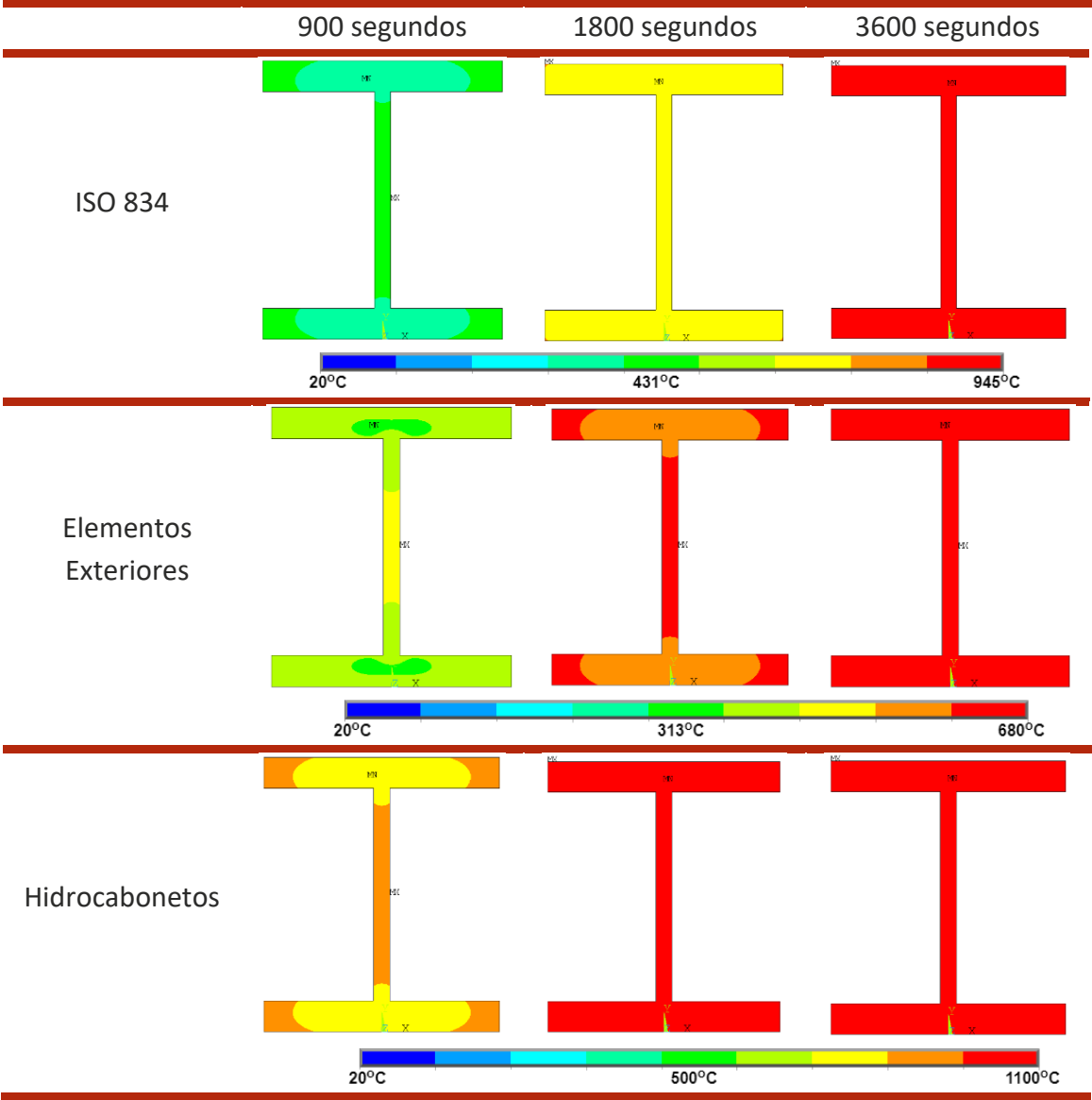
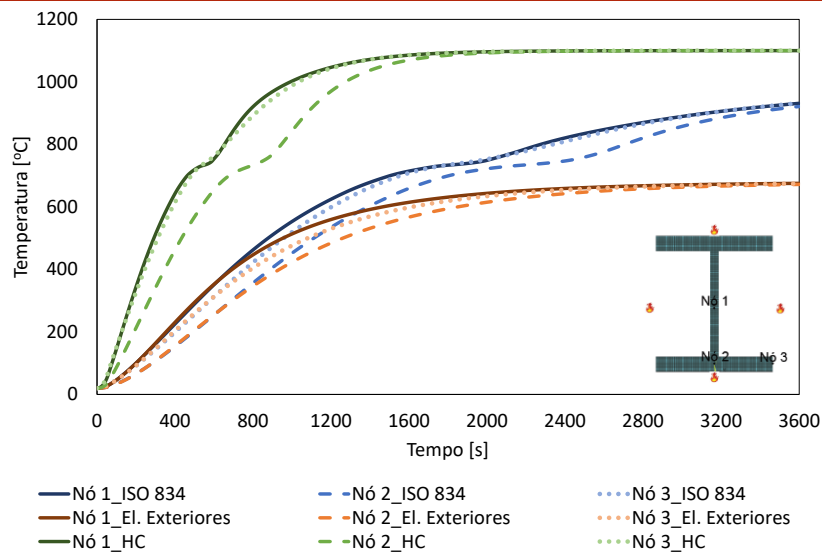
Método Simplificado do Eurocódigo 3



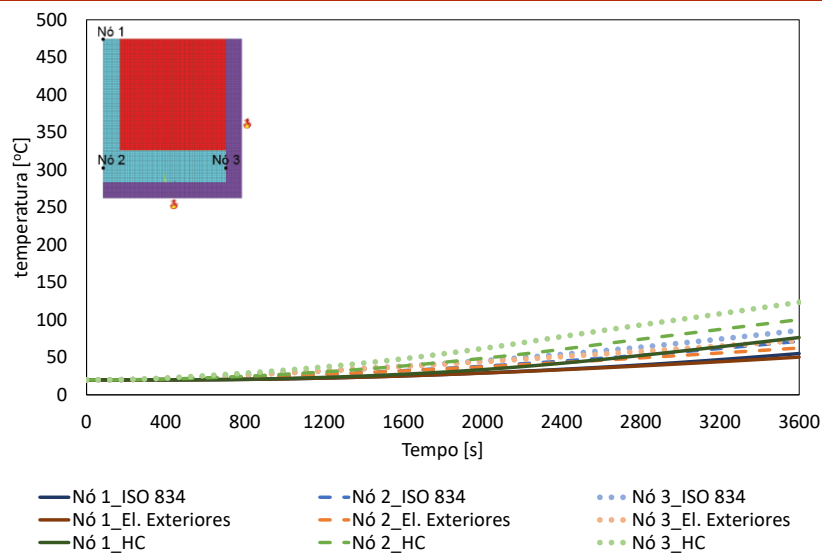
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

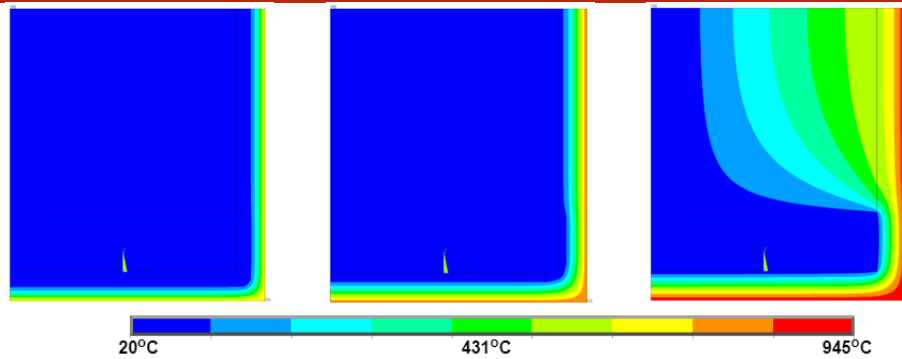


900 segundos

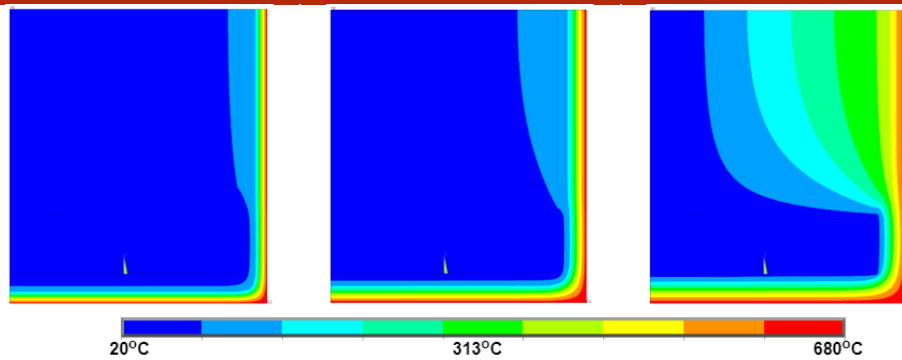
1800 segundos

3600 segundos

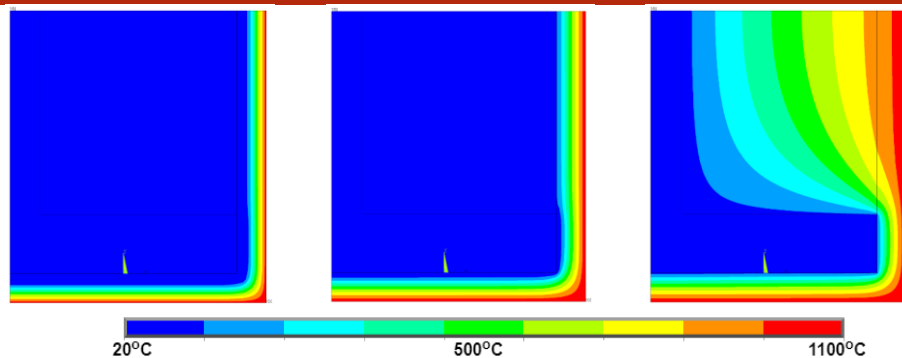
ISO 834



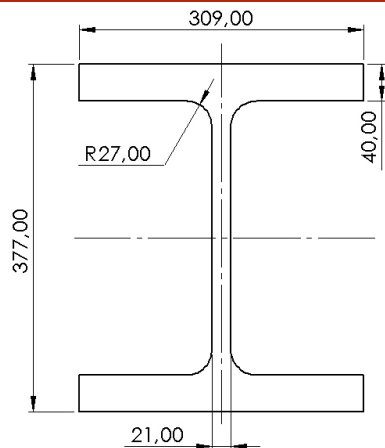
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

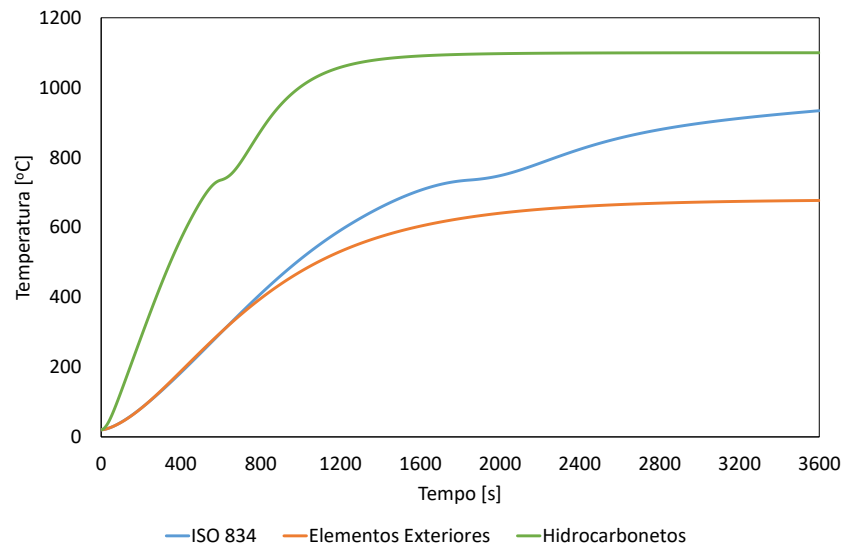


HEM 340

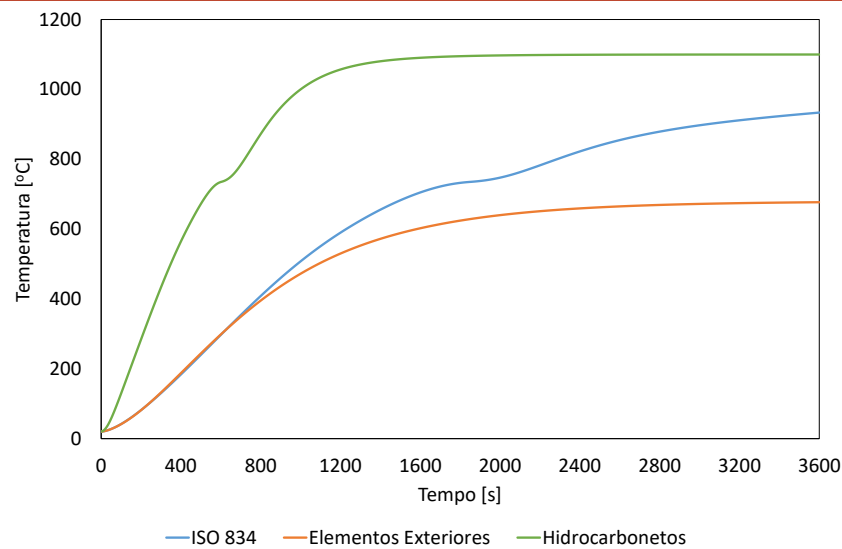


Perímetro [m]	1,9016
Área [m²]	0,03158
Fator de massividade [m ⁻¹]	60,27
Comprimento Característico [m]	0,017

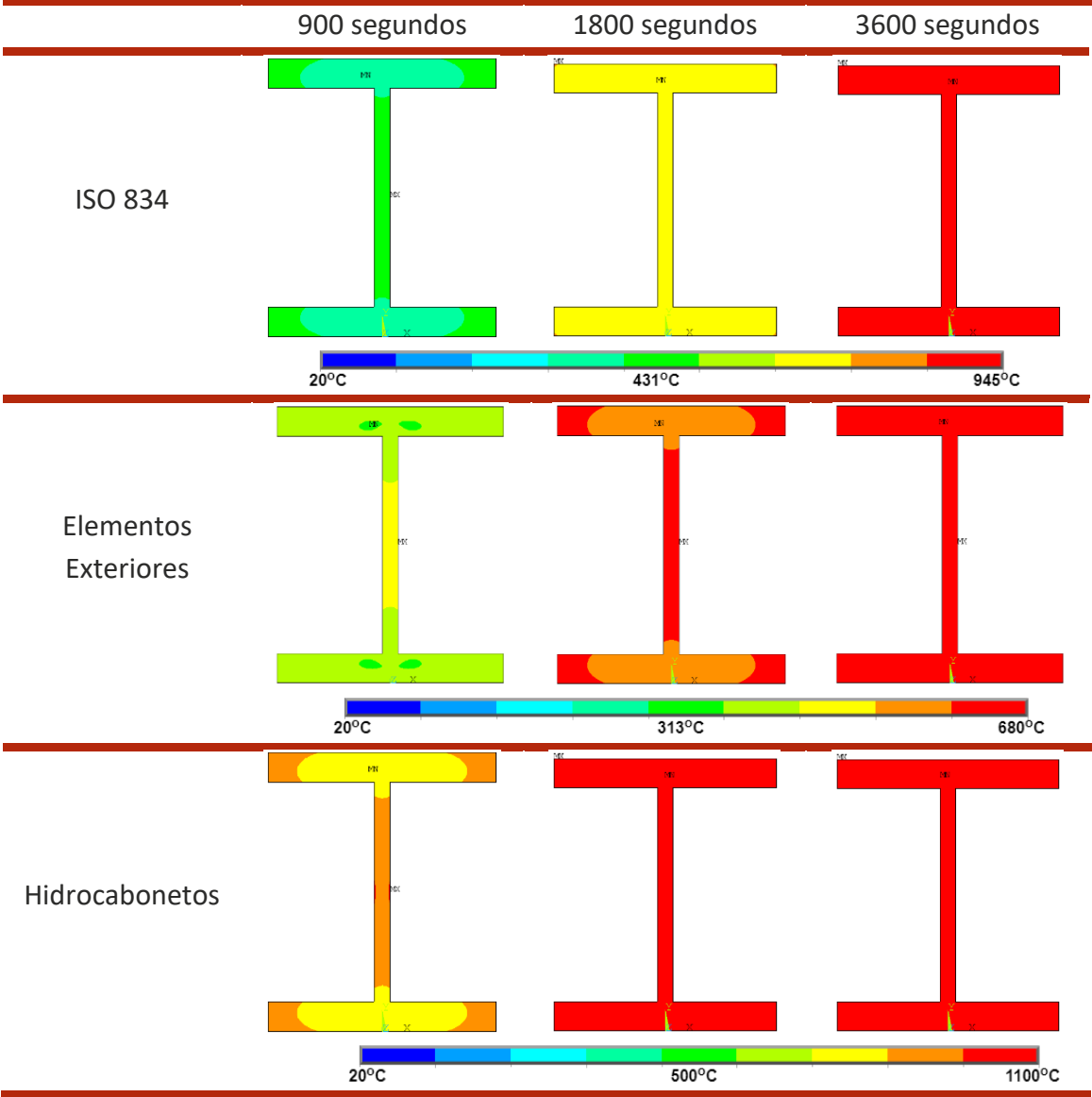
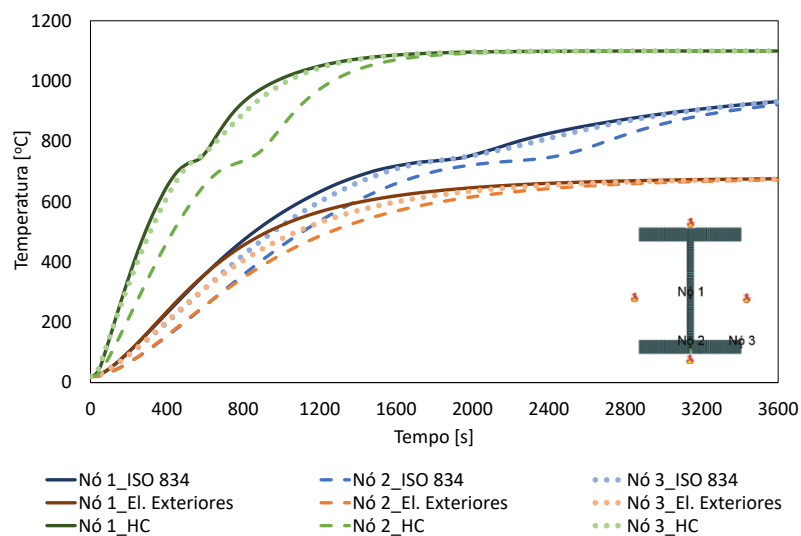
Método Simplificado do Eurocódigo 3



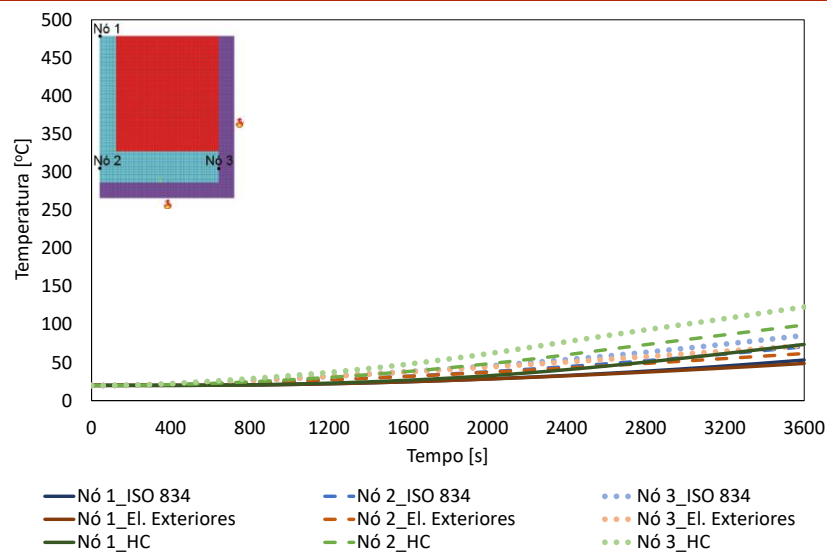
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

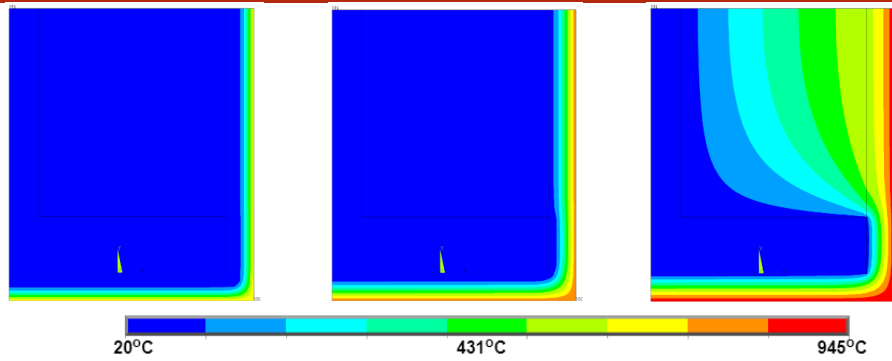


900 segundos

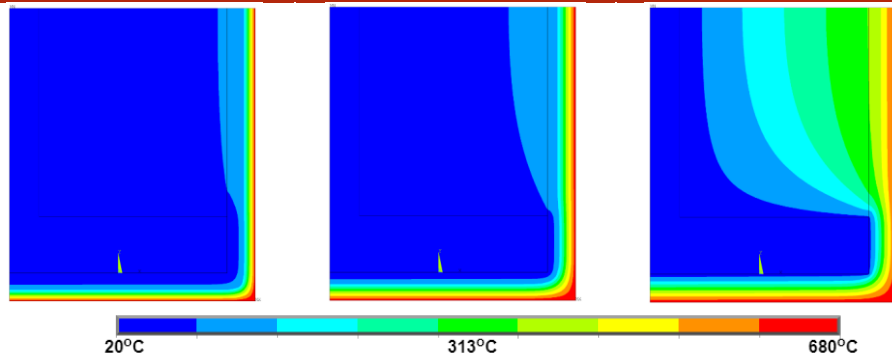
1800 segundos

3600 segundos

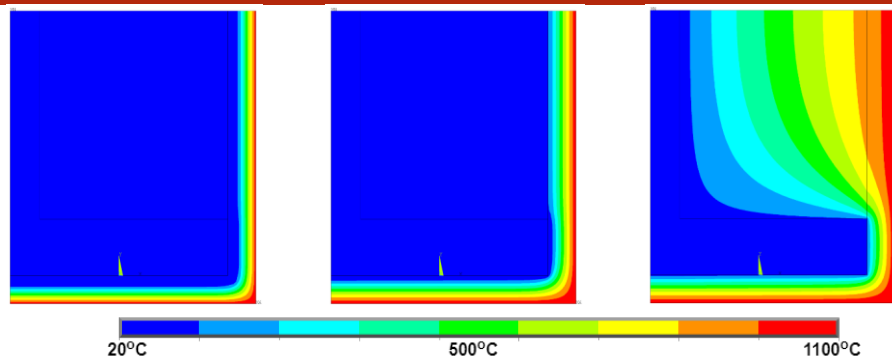
ISO 834



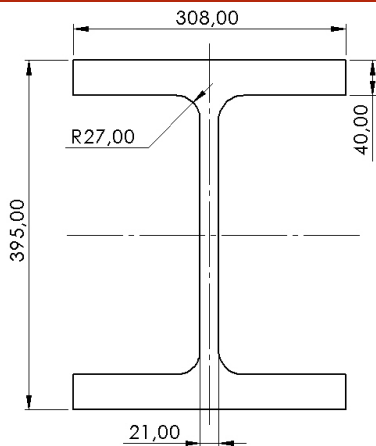
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

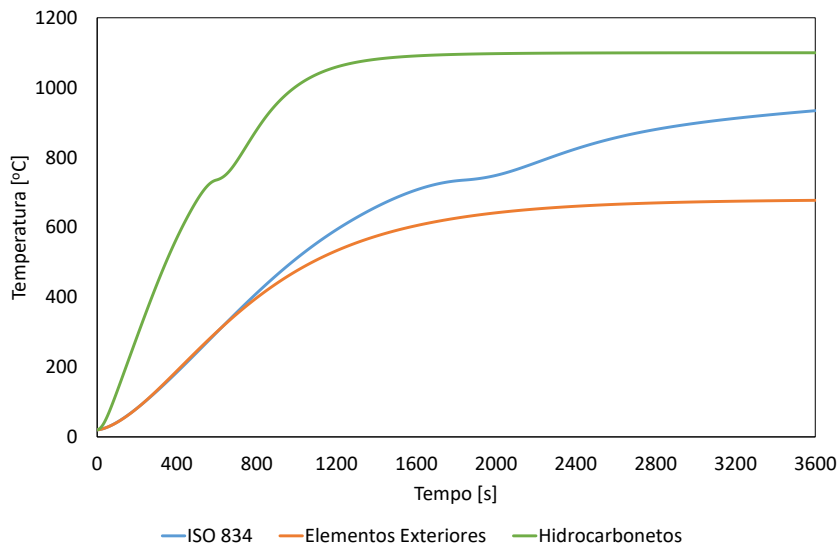


HEM 360

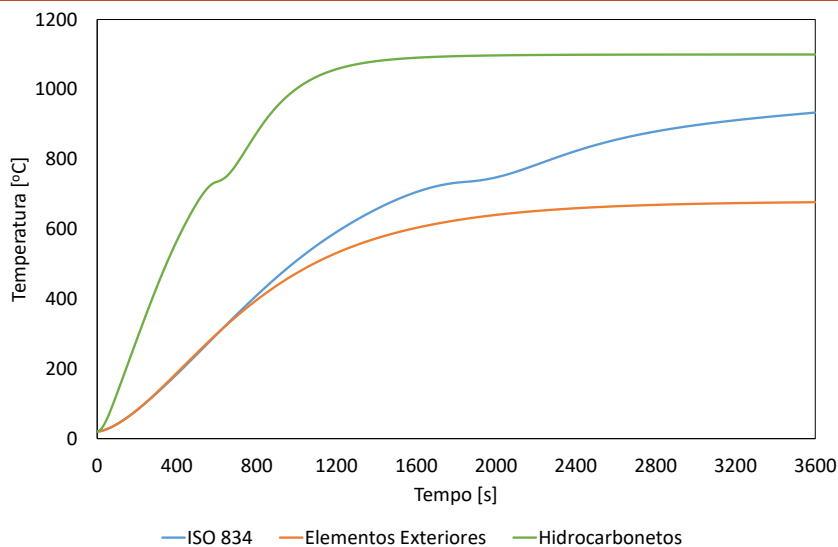


Perímetro [m]	1,9336
Área [m²]	0,03188
Fator de massividade [m ⁻¹]	60,65
Comprimento Característico [m]	0,016

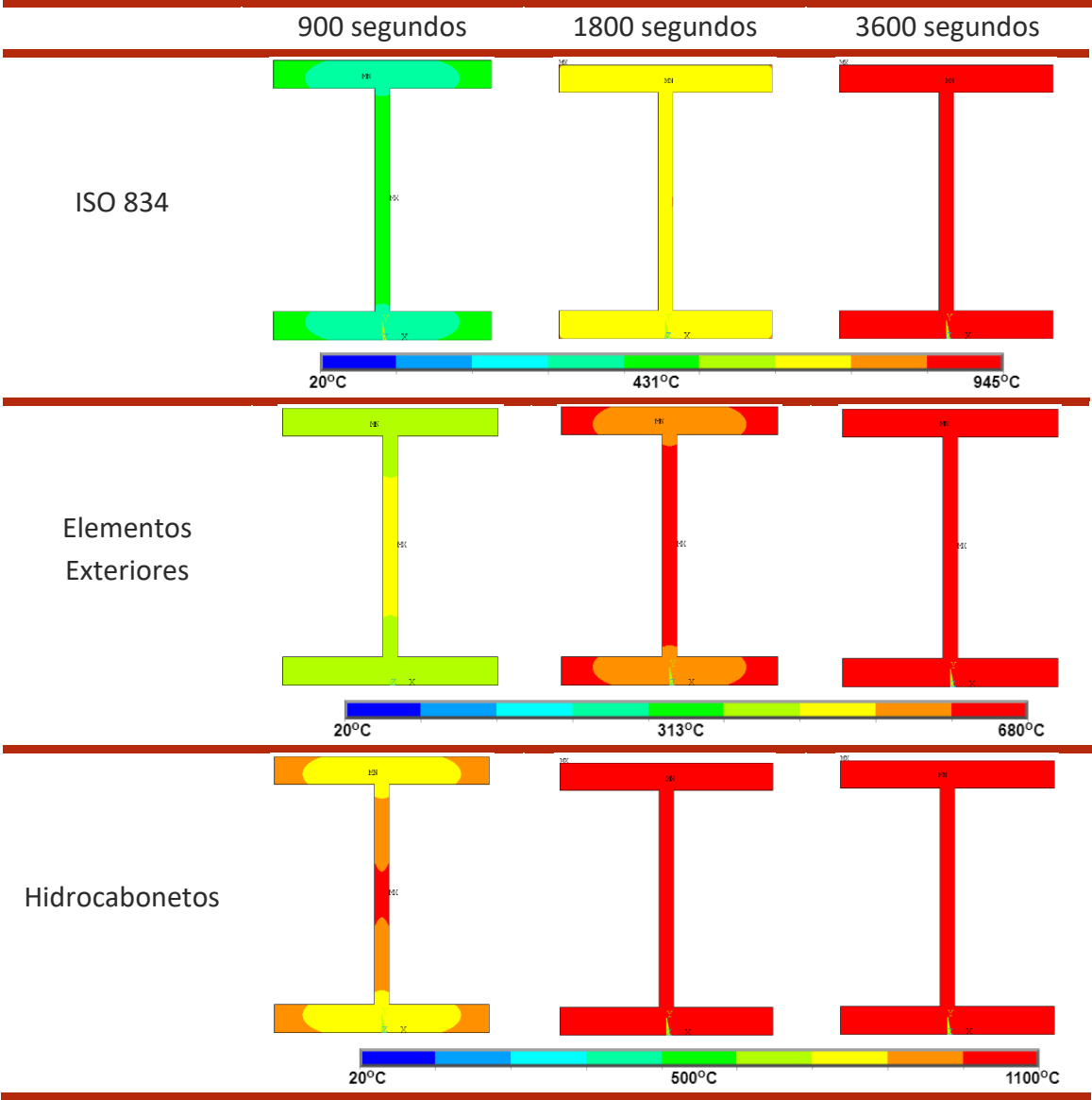
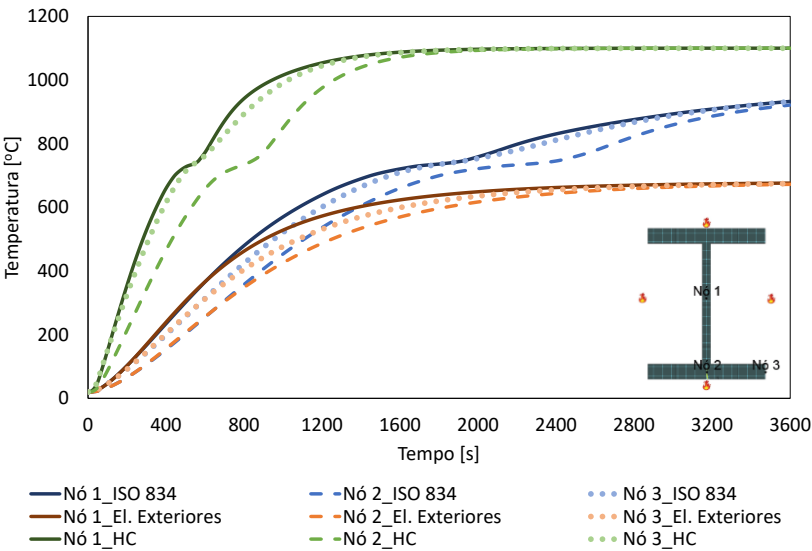
Método Simplificado do Eurocódigo 3



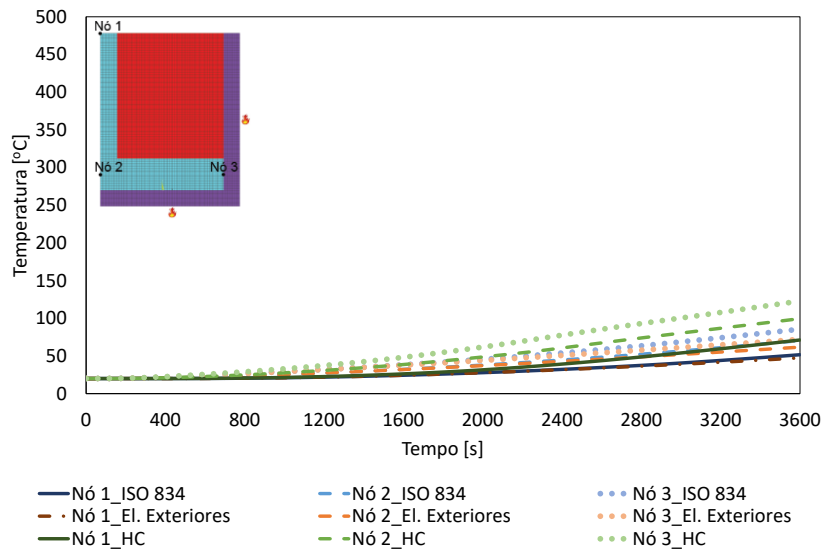
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

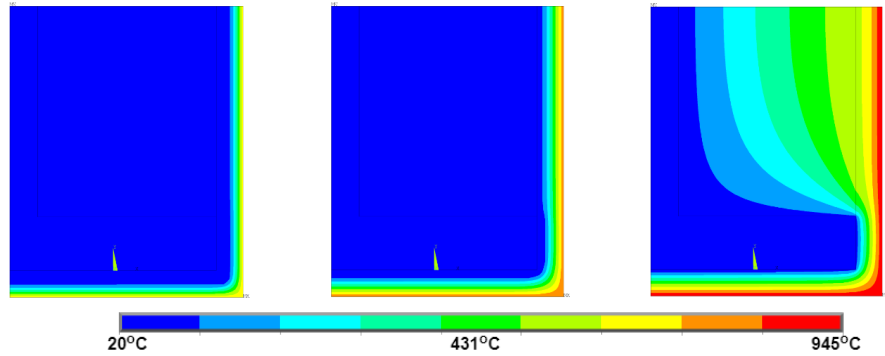


900 segundos

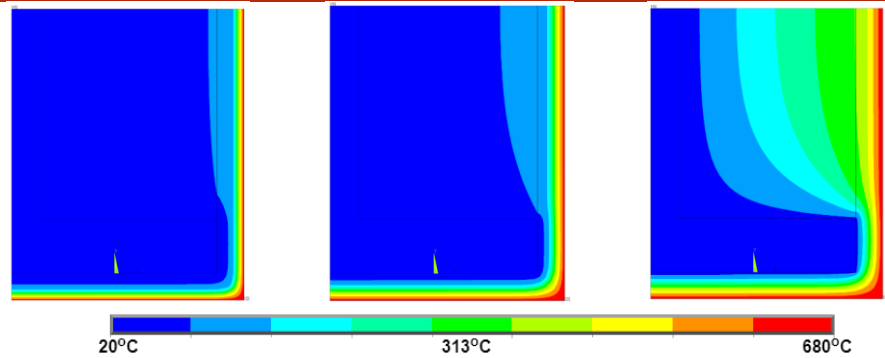
1800 segundos

3600 segundos

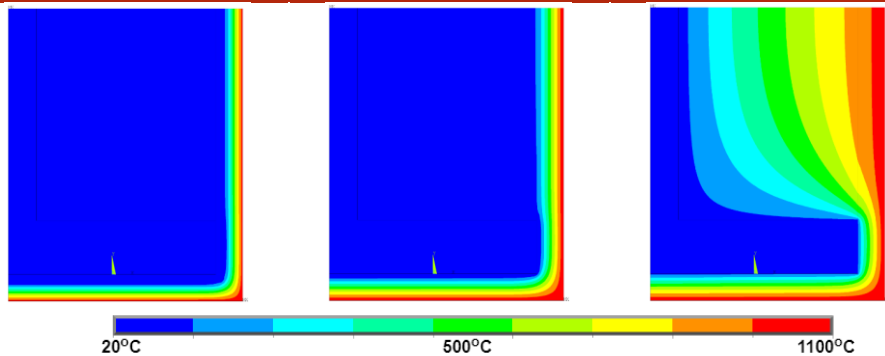
ISO 834



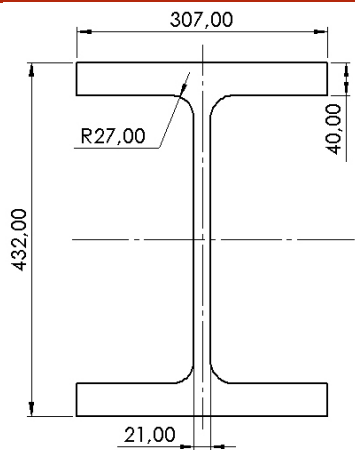
Elementos Exteriores



Hidrocabonetos

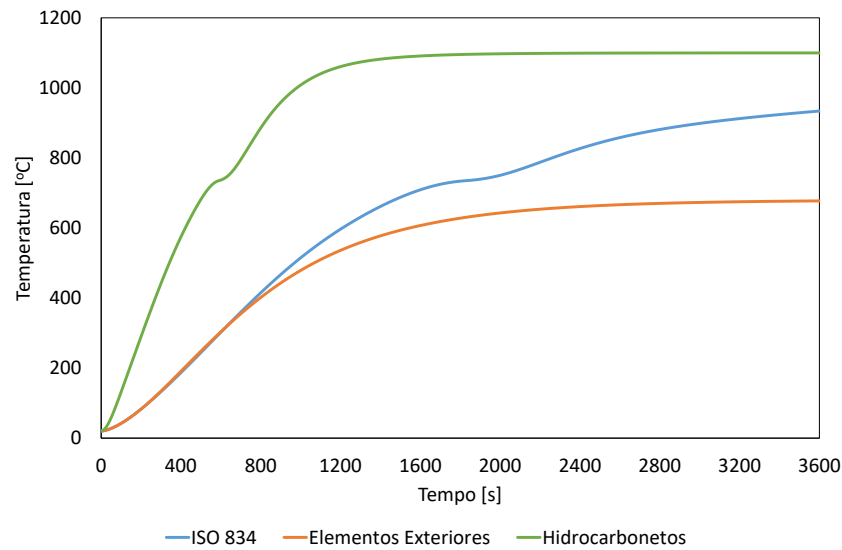


HEM 400

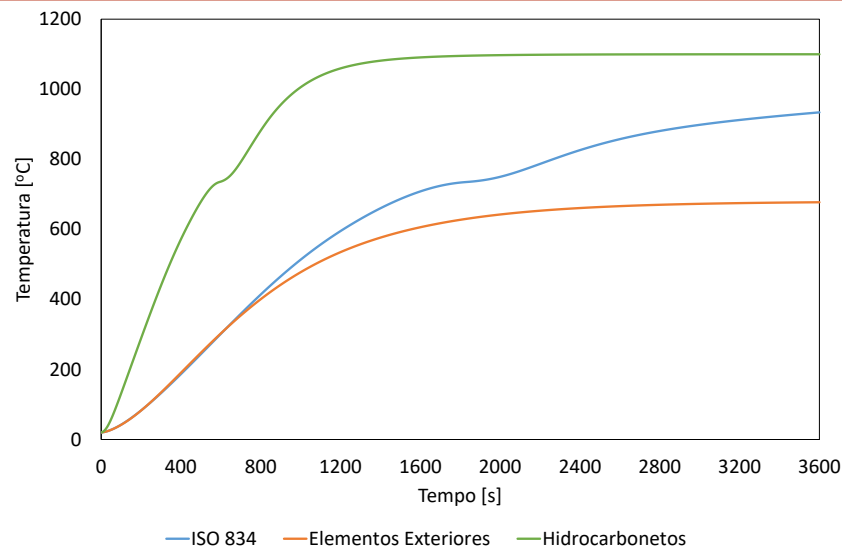


Perímetro [m]	2,0036
Área [m²]	0,03258
Fator de massividade [m ⁻¹]	61,49
Comprimento Característico [m]	0,016

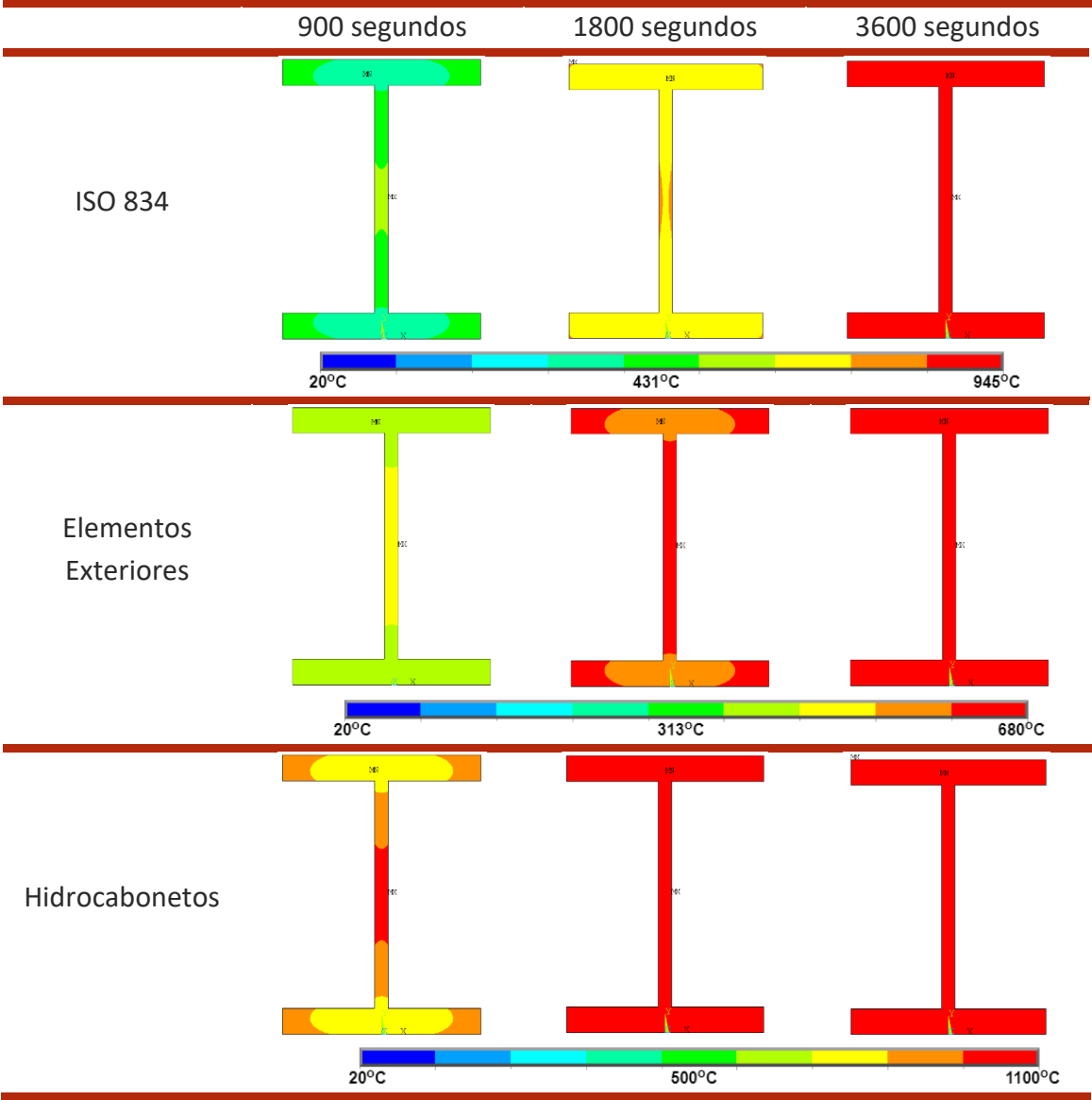
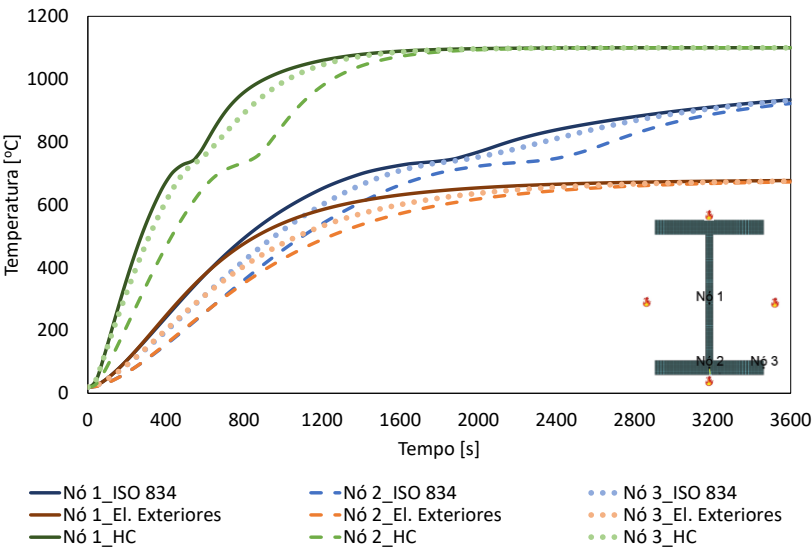
Método Simplificado do Eurocódigo 3



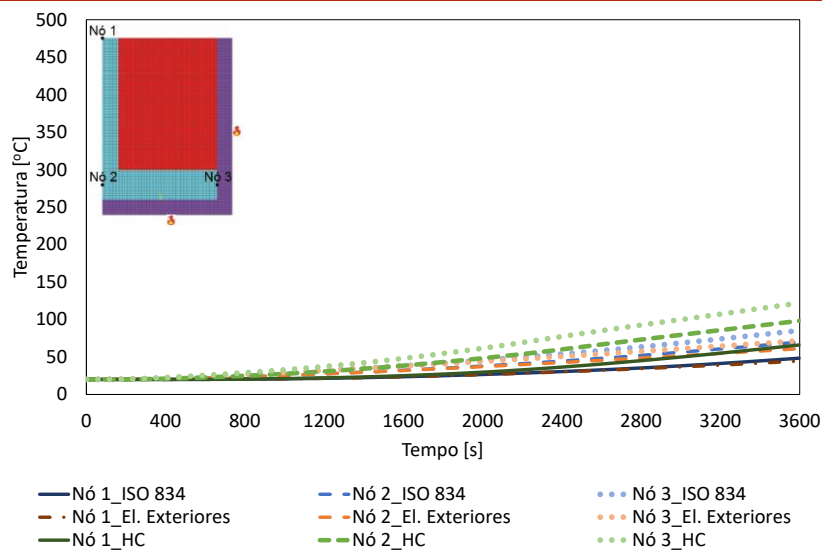
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

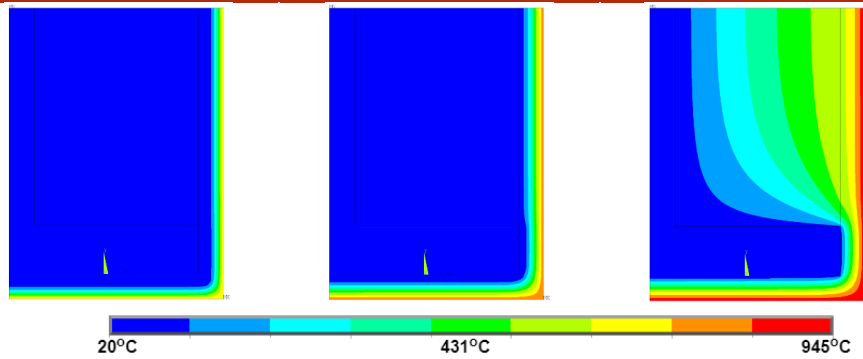
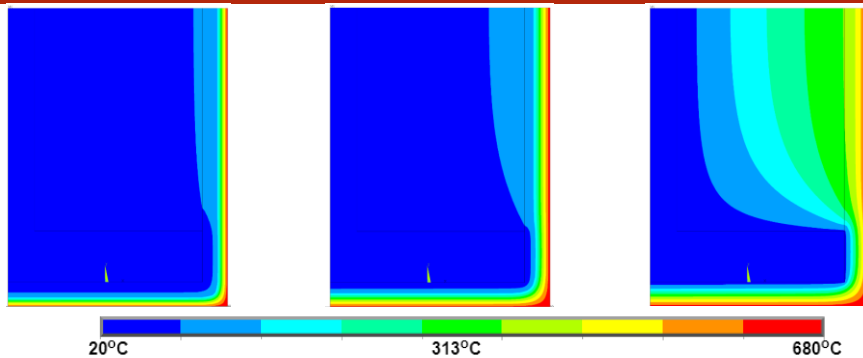


900 segundos

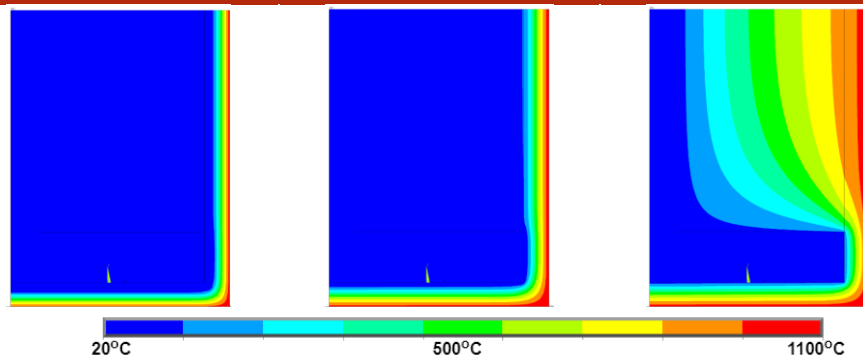
1800 segundos

3600 segundos

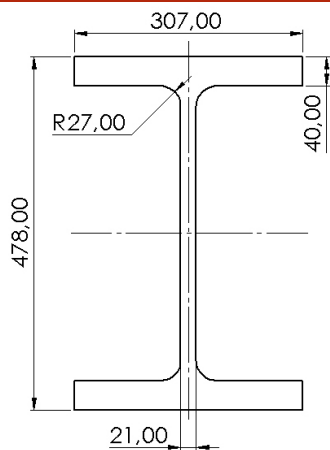
ISO 834

Elementos
Exteriores

Hidrocarbonetos

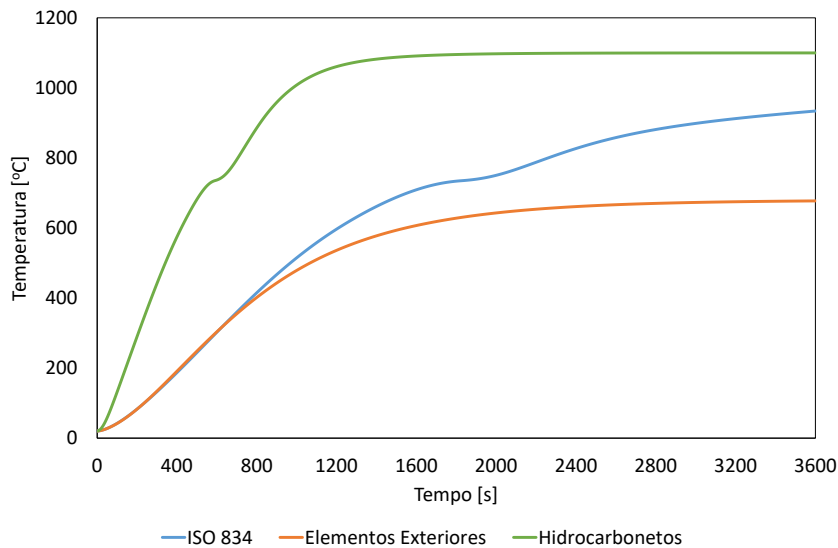


HEM 450

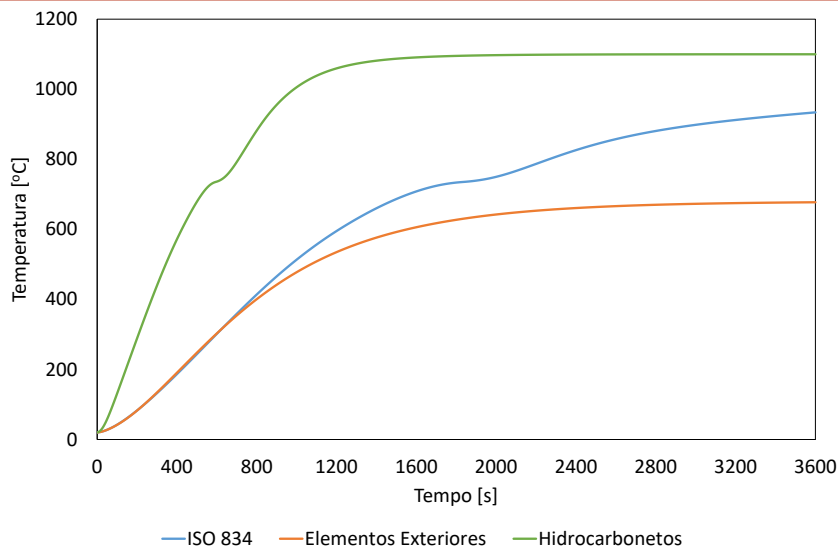


Perímetro [m]	2,0956
Área [m²]	0,03354
Fator de massividade [m ⁻¹]	62,48
Comprimento Característico [m]	0,016

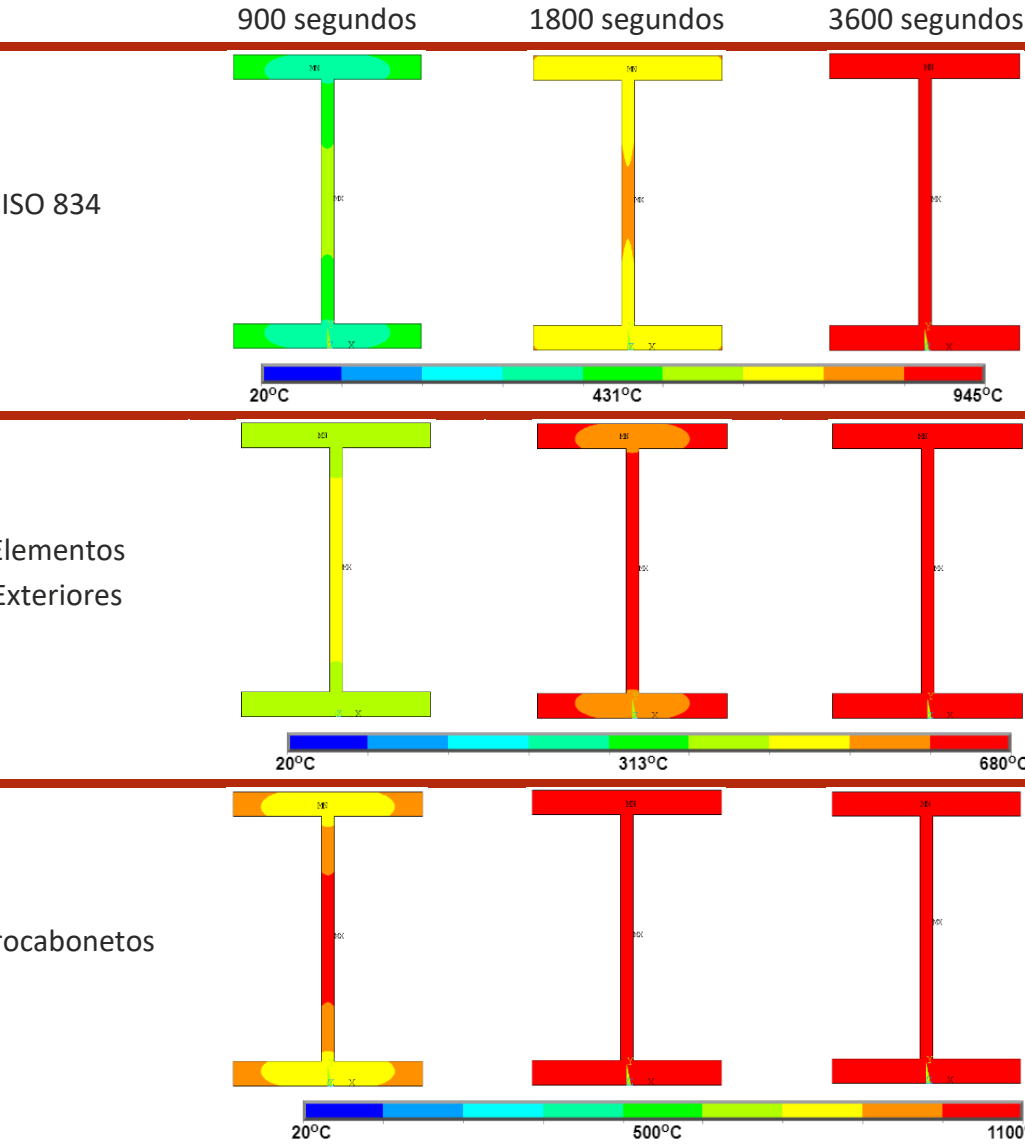
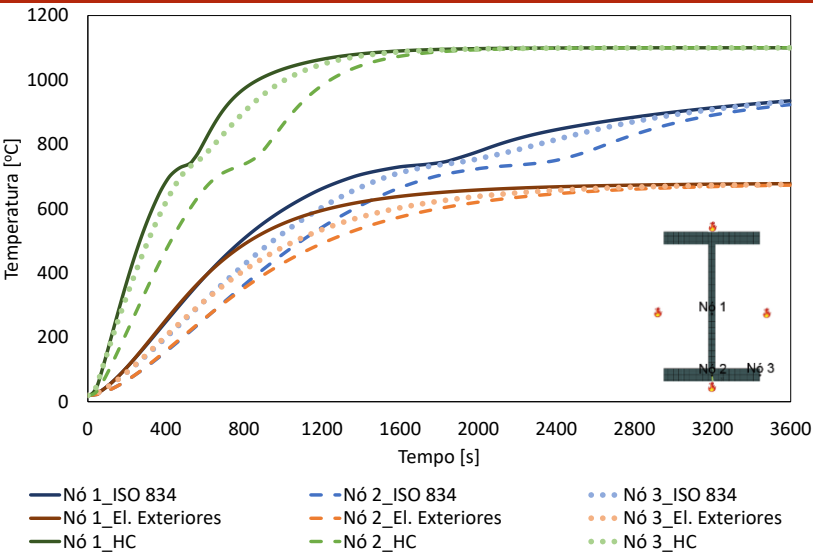
Método Simplificado do Eurocódigo 3



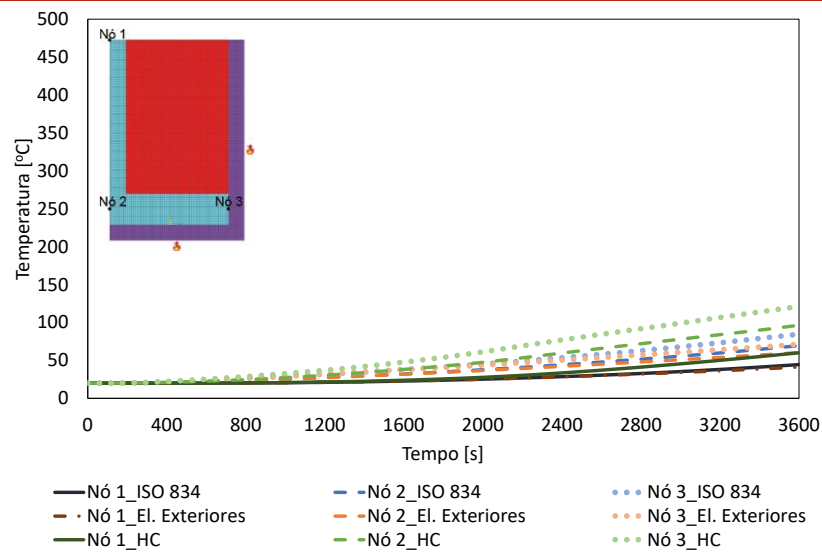
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

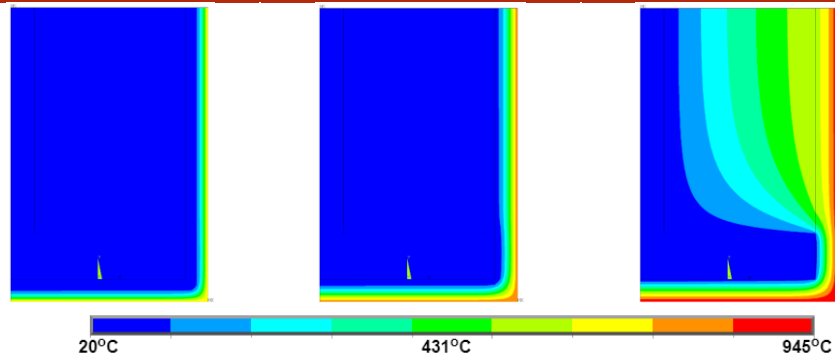


900 segundos

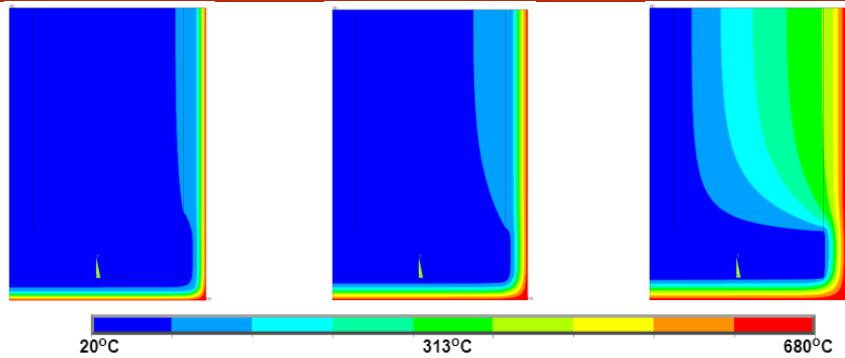
1800 segundos

3600 segundos

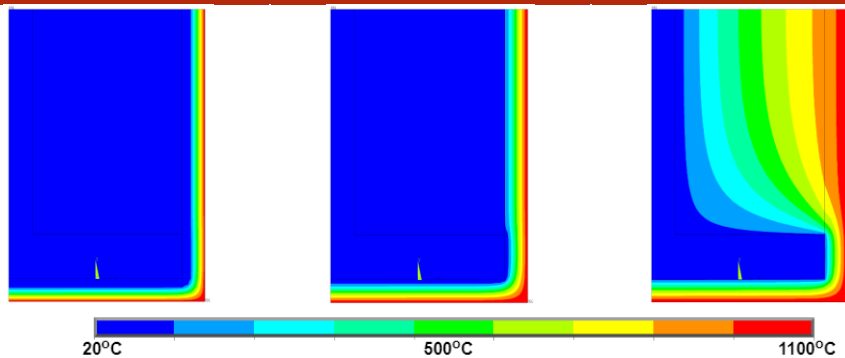
ISO 834



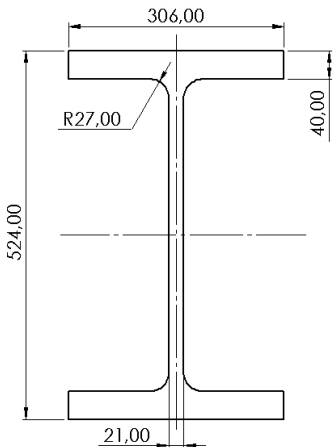
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

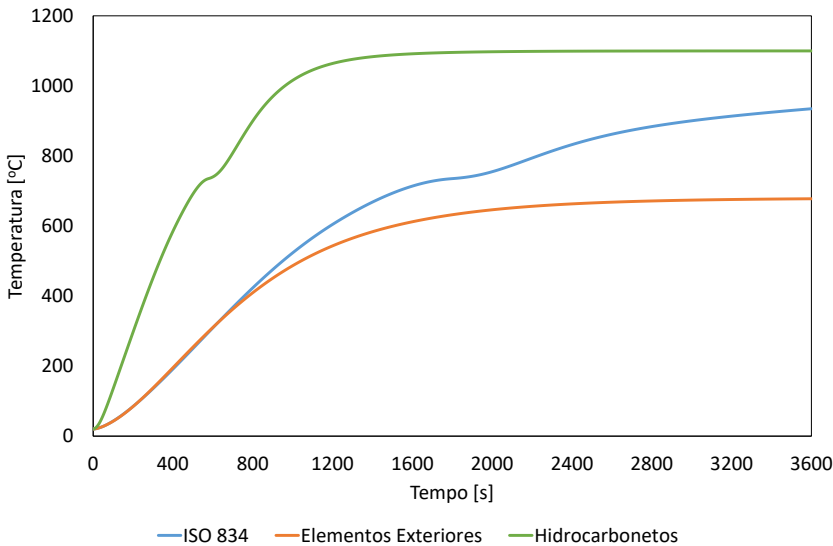


HEM 500

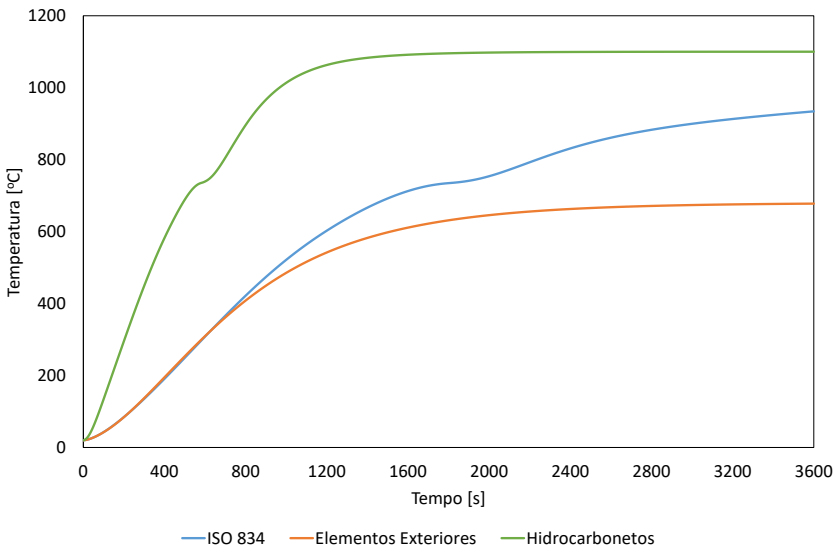


Perímetro [m]	2,1836
Área [m²]	0,03443
Fator de massividade [m ⁻¹]	63,42
Comprimento Característico [m]	0,0158

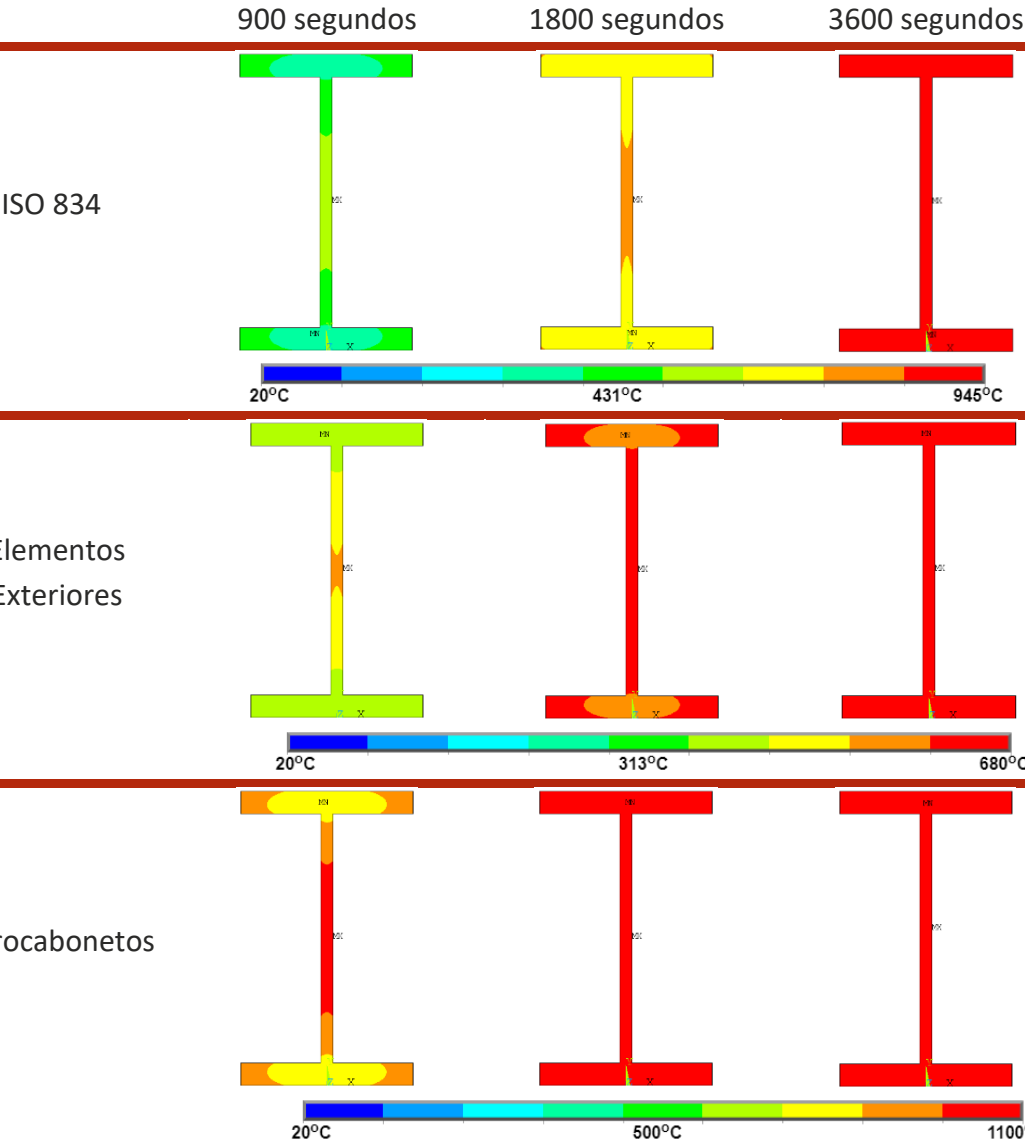
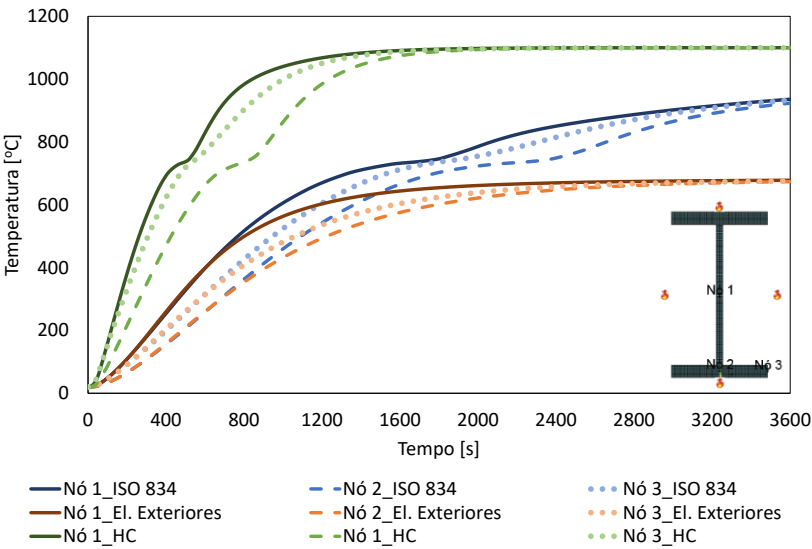
Método Simplificado do Eurocódigo 3



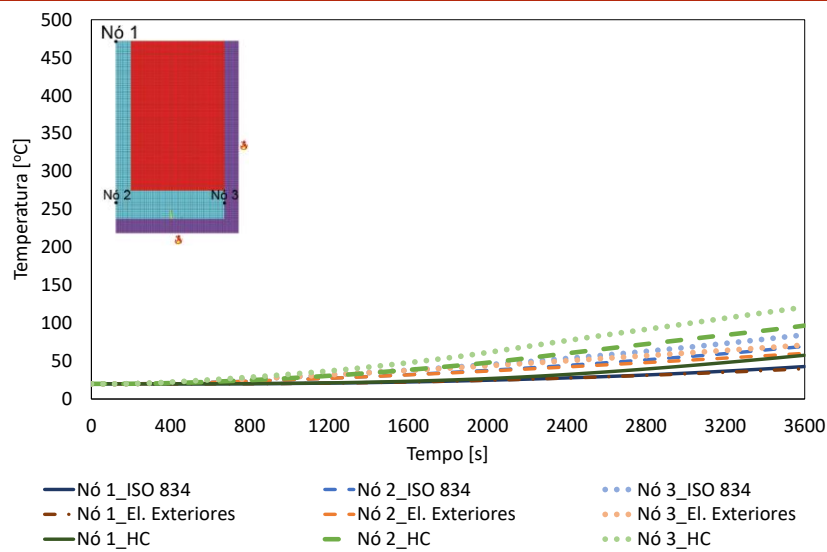
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

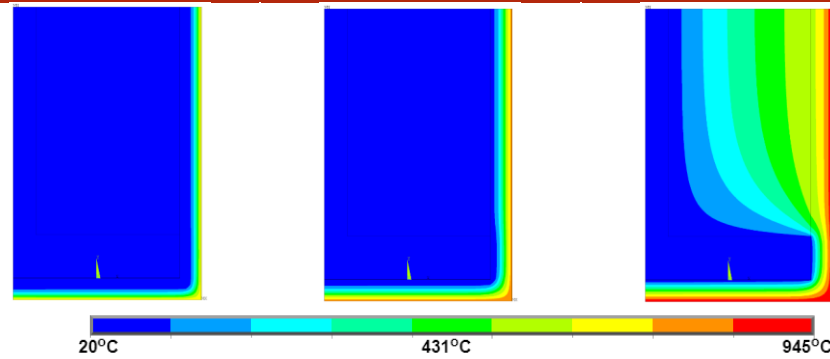
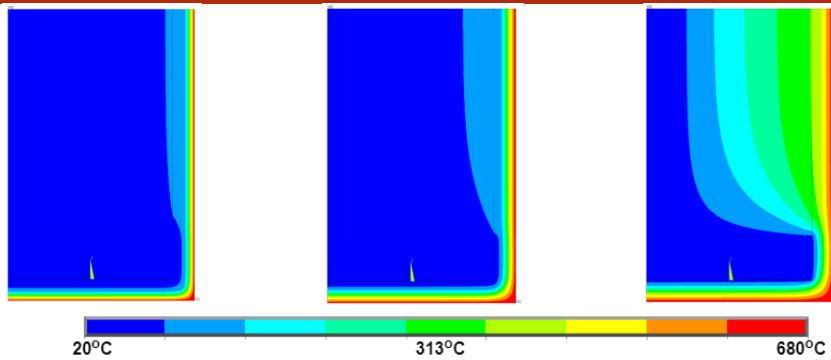


900 segundos

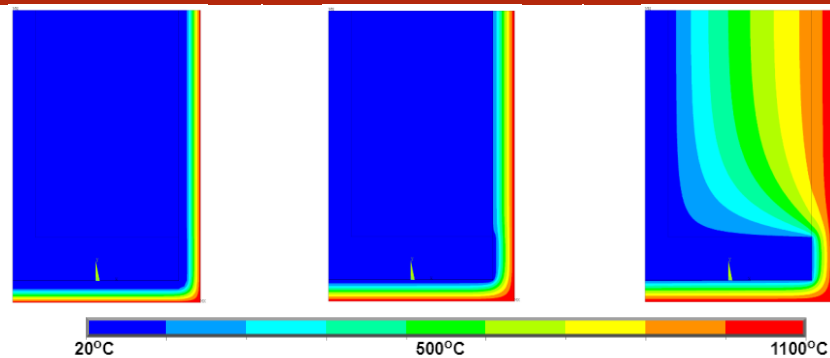
1800 segundos

3600 segundos

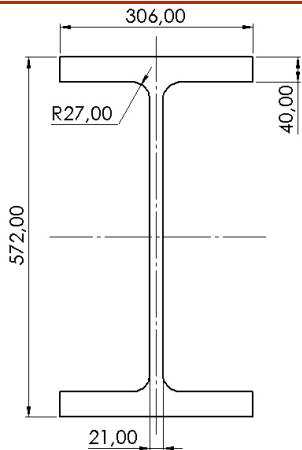
ISO 834

Elementos
Exteriores

Hidrocarbonetos

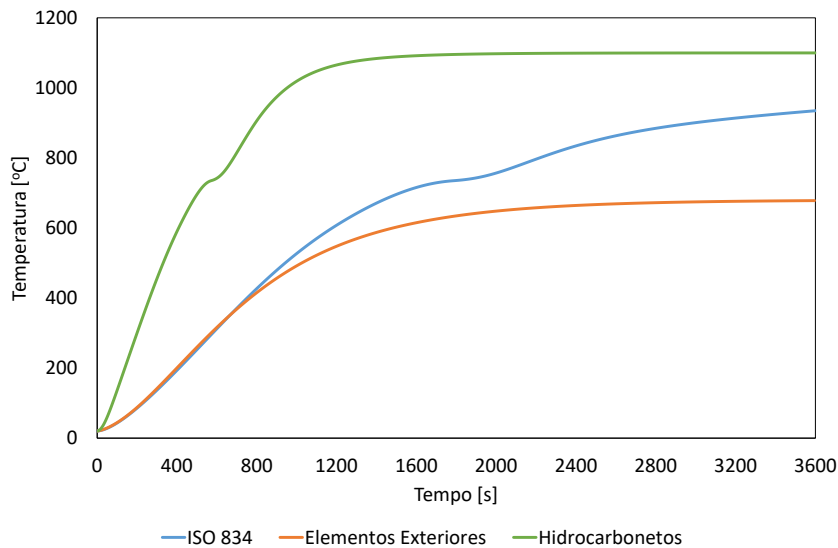


HEM 550

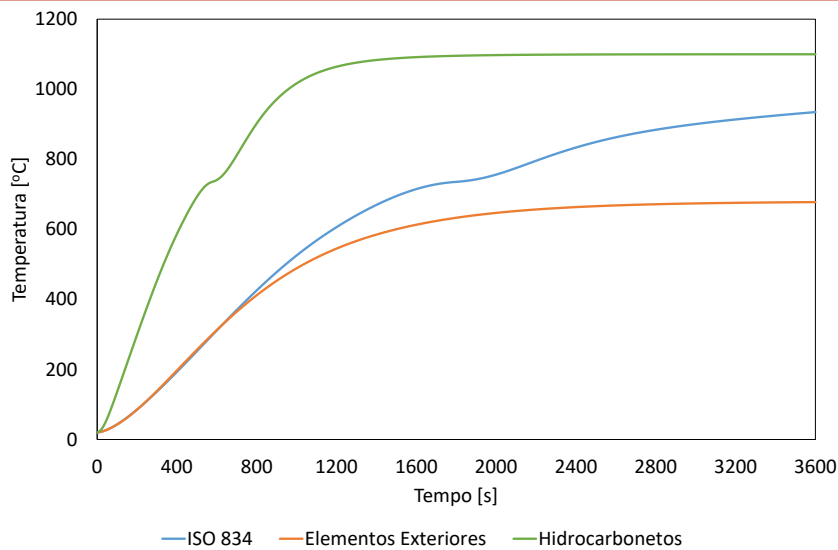


Perímetro [m]	2,2796
Área [m²]	0,03544
Fator de massividade [m ⁻¹]	64,32
Comprimento Característico [m]	0,0155

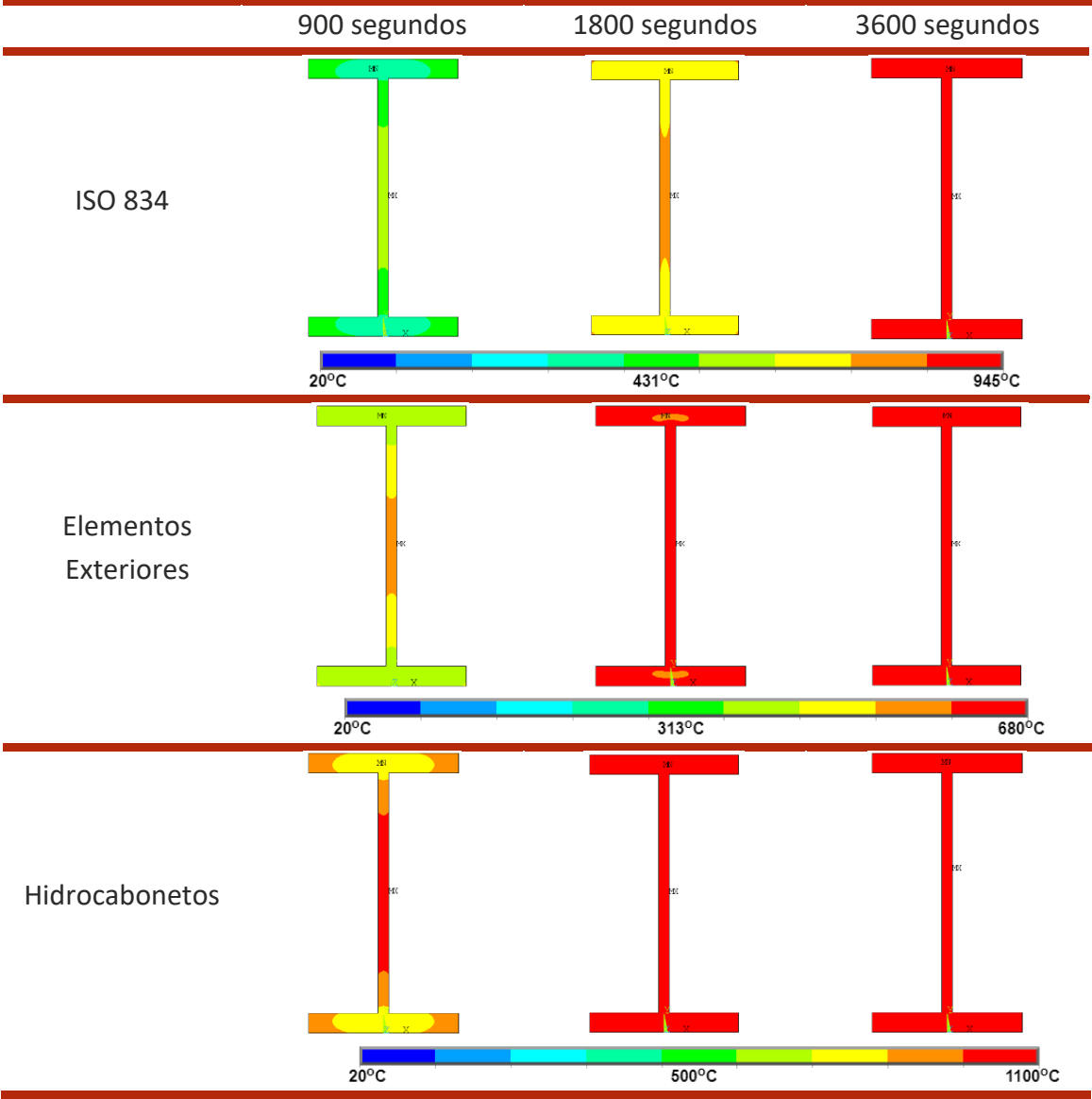
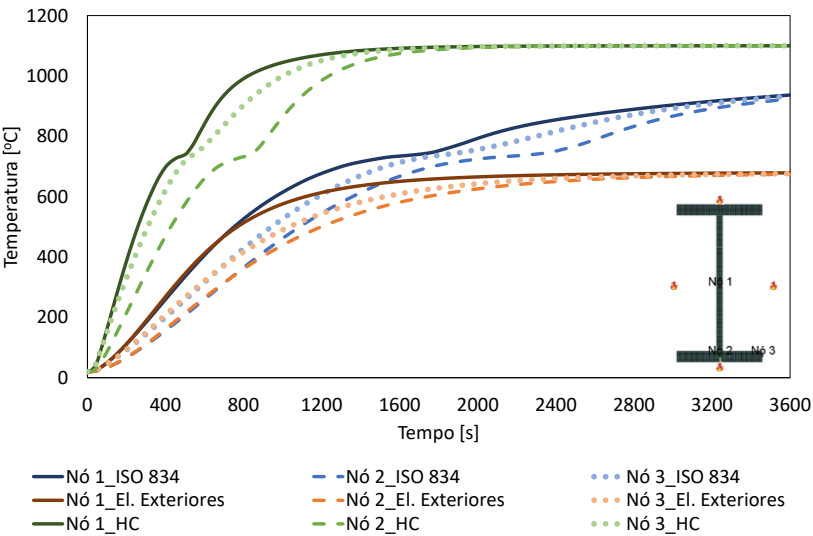
Método Simplificado do Eurocódigo 3



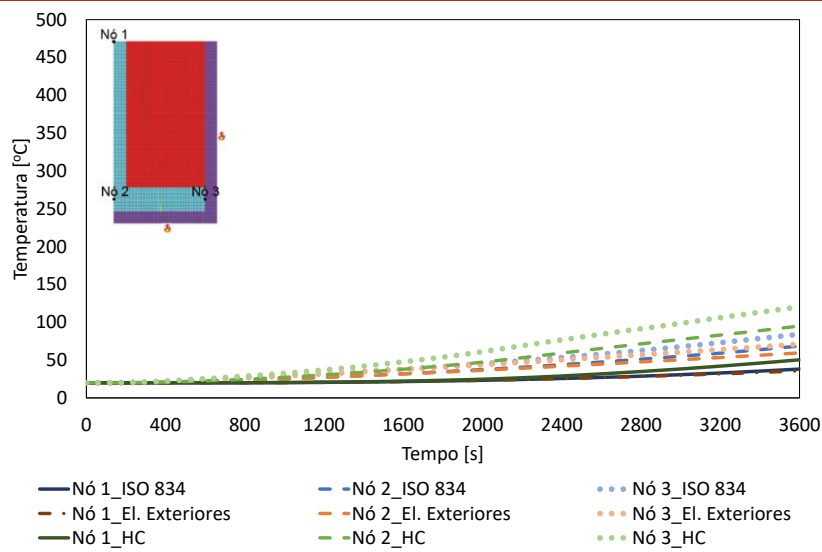
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

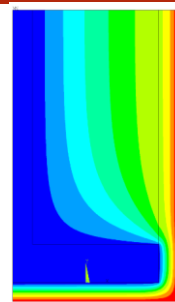
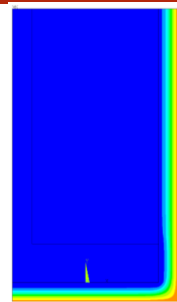
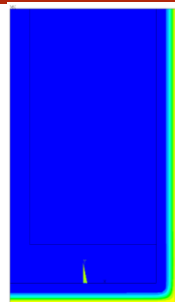


900 segundos

1800 segundos

3600 segundos

ISO 834

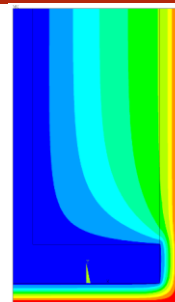
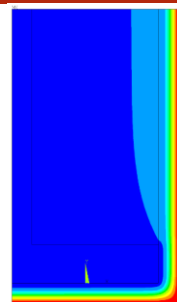
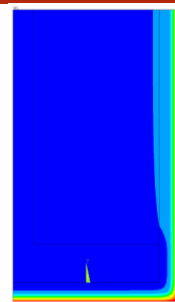


20°C

431°C

945°C

Elementos Exteriores

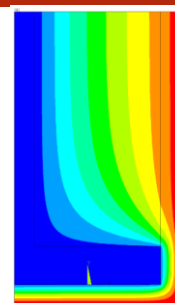
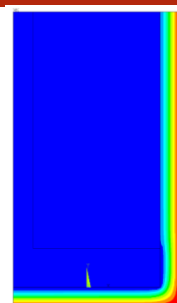
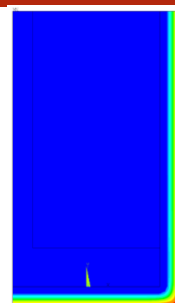


20°C

313°C

680°C

Hidrocarbonetos

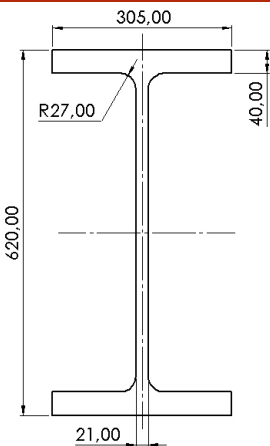


20°C

500°C

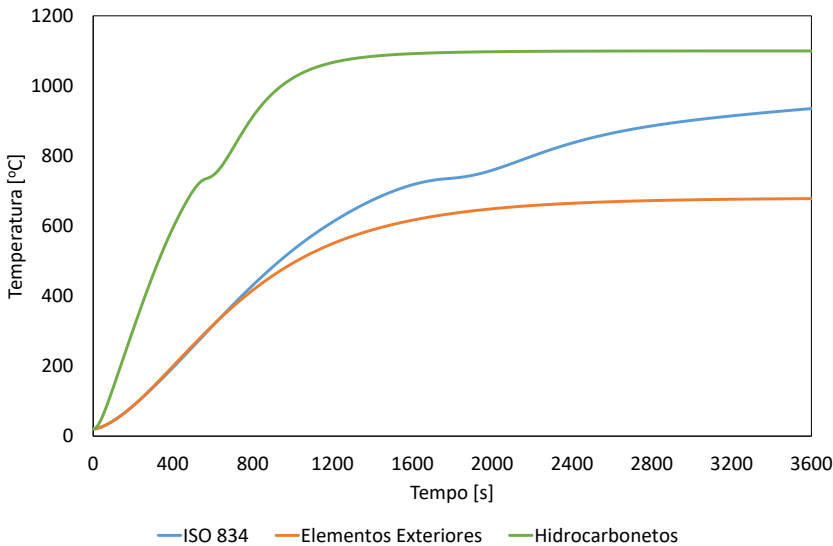
1100°C

HEM 600

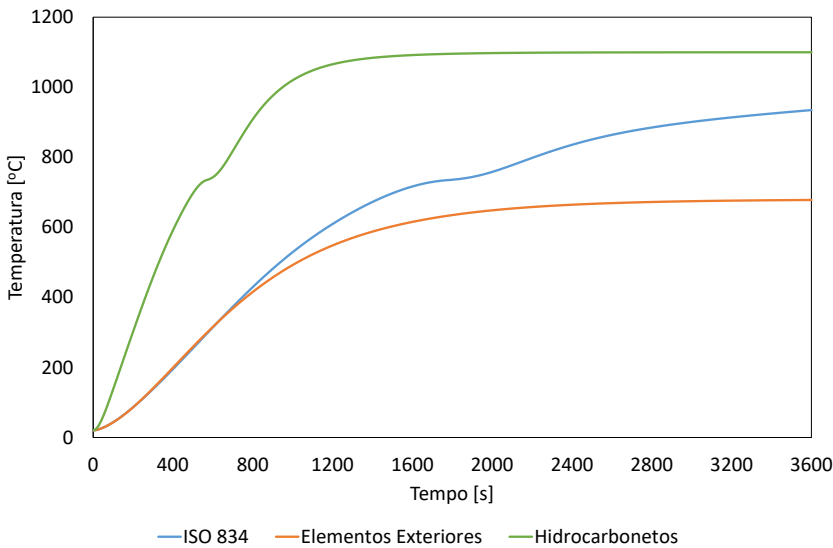


Perímetro [m]	2,3716
Área [m²]	0,03637
Fator de massividade [m ⁻¹]	65,21
Comprimento Característico [m]	0,0153

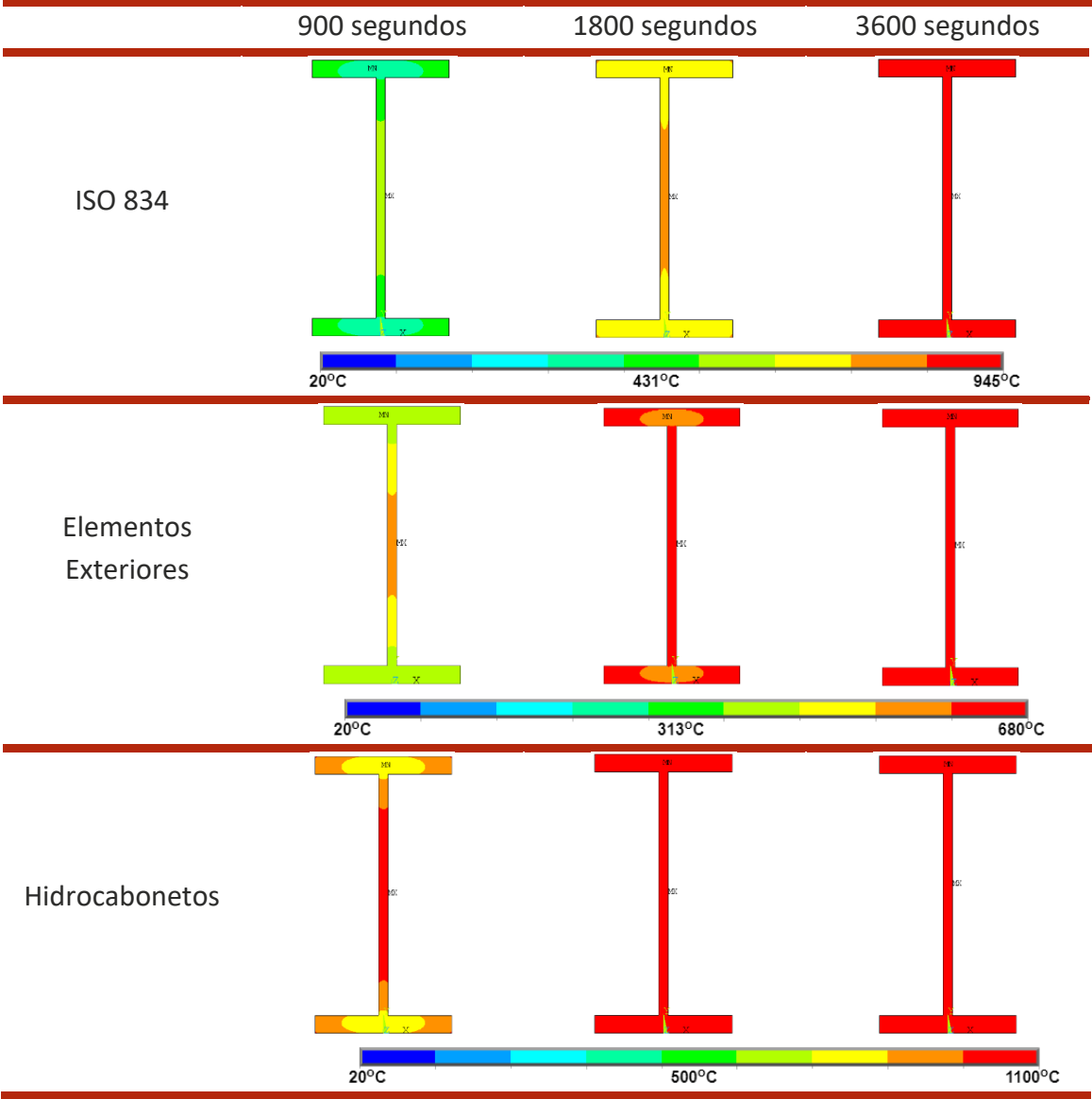
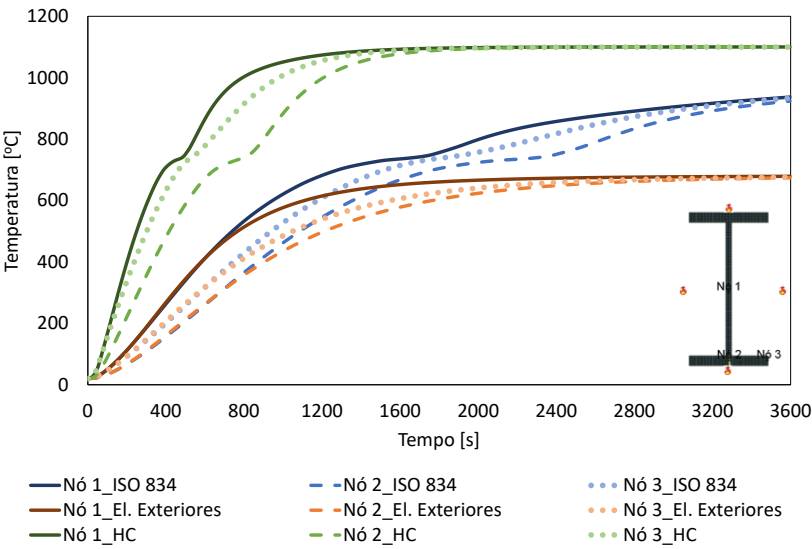
Método Simplificado do Eurocódigo 3



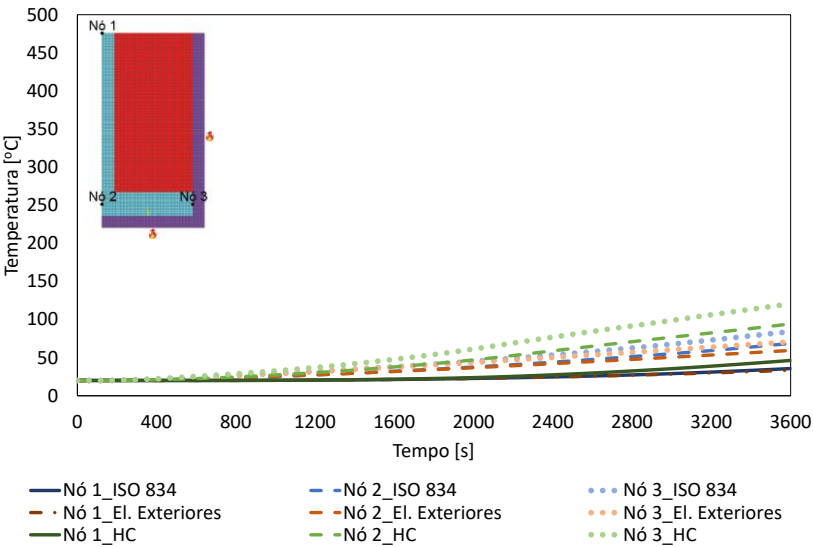
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

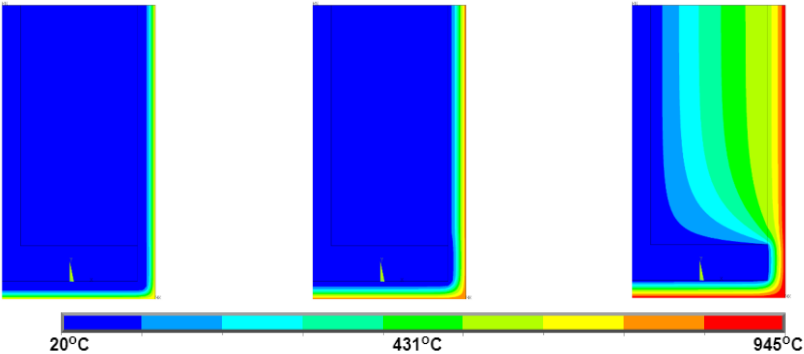


900 segundos

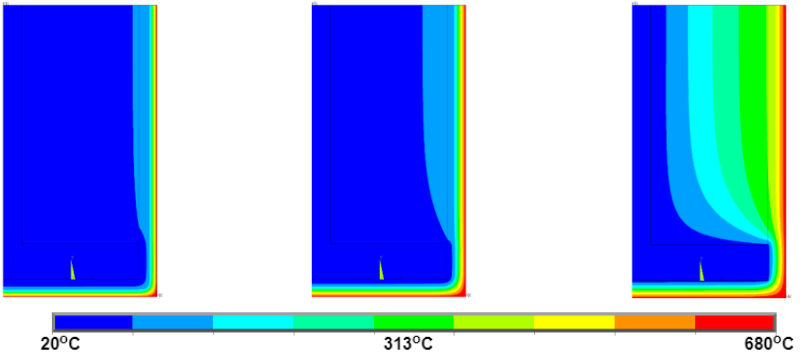
1800 segundos

3600 segundos

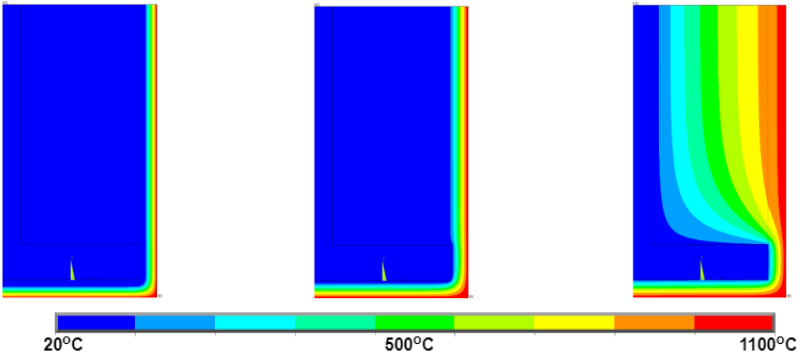
ISO 834



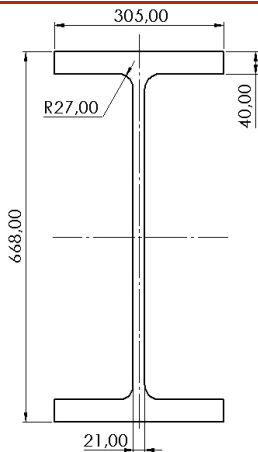
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

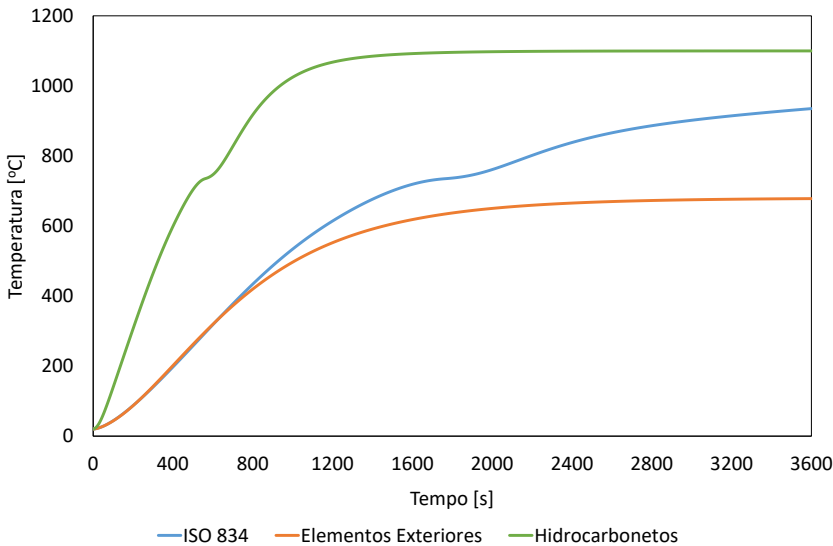


HEM 650

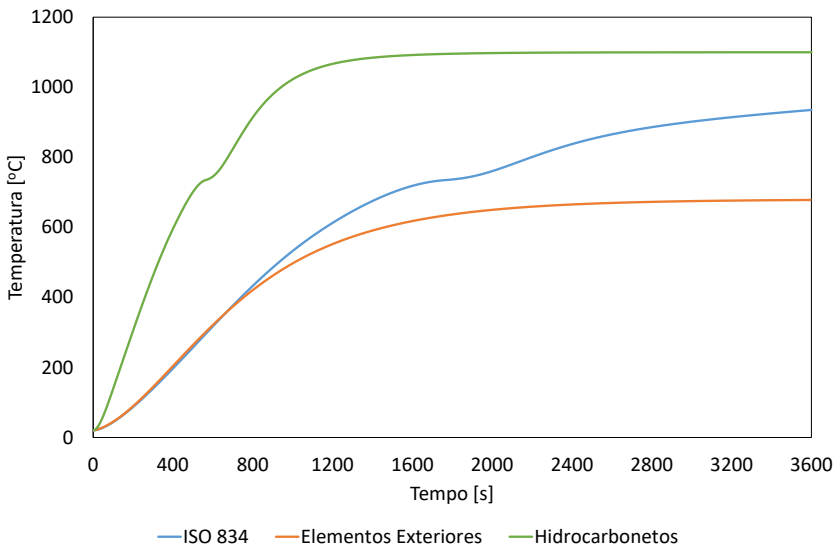


Perímetro [m]	2,4676
Área [m²]	0,03737
Fator de massividade [m ⁻¹]	66,03
Comprimento Característico [m]	0,0151

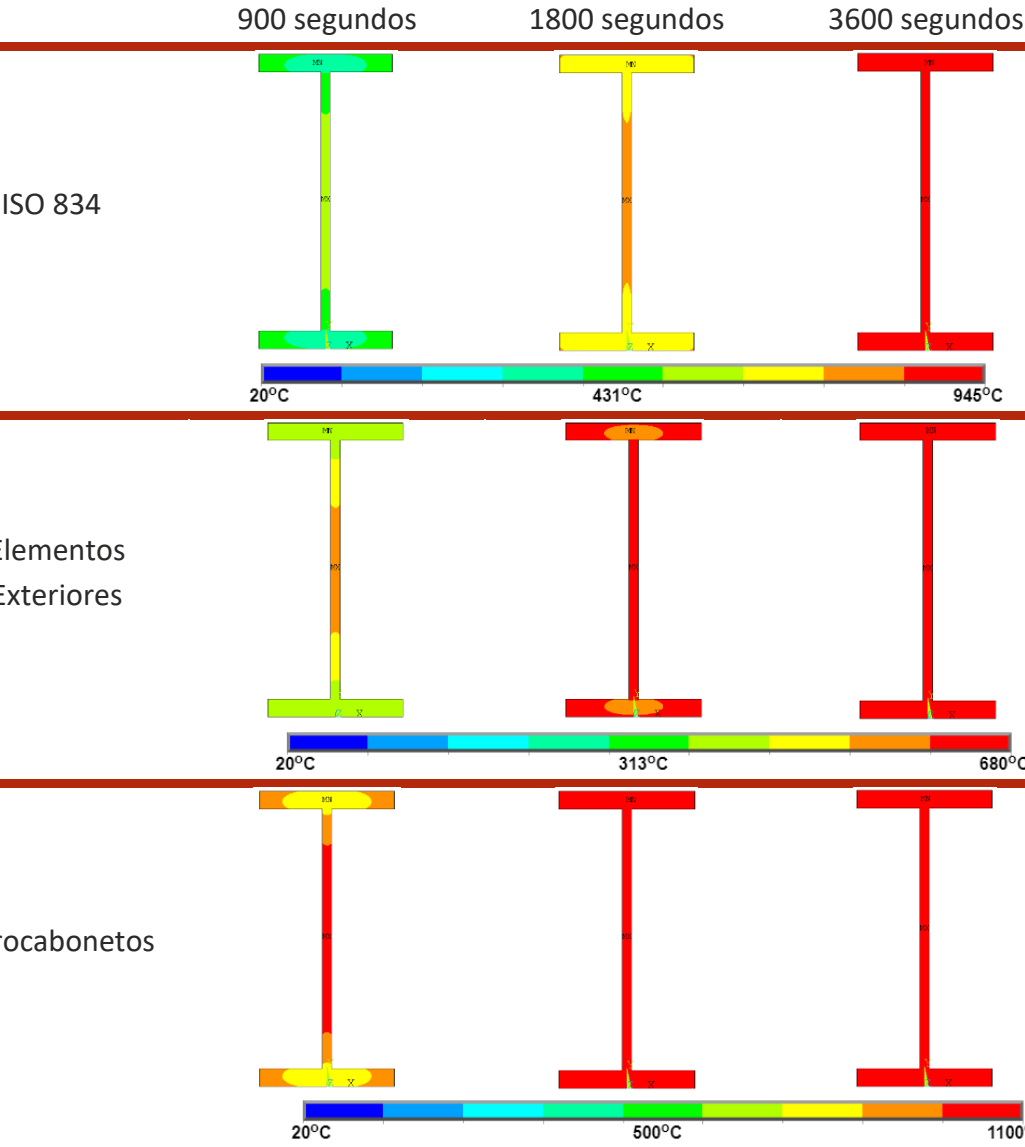
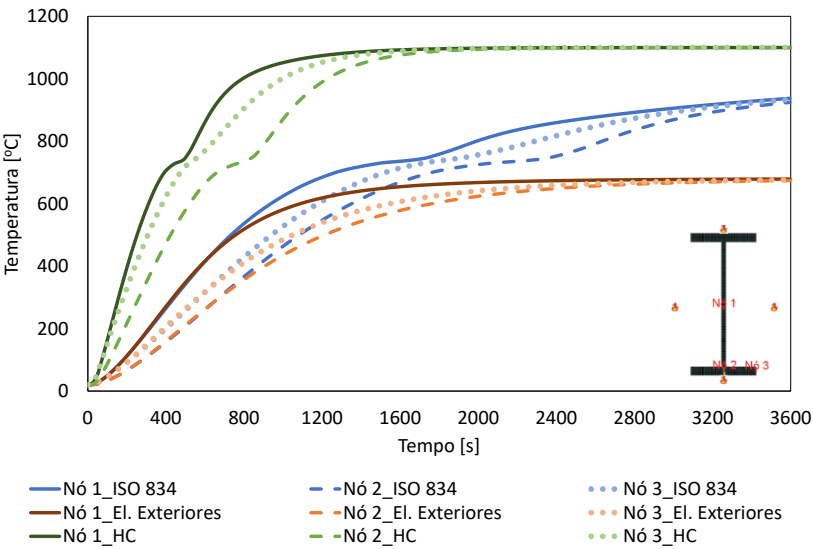
Método Simplificado do Eurocódigo 3



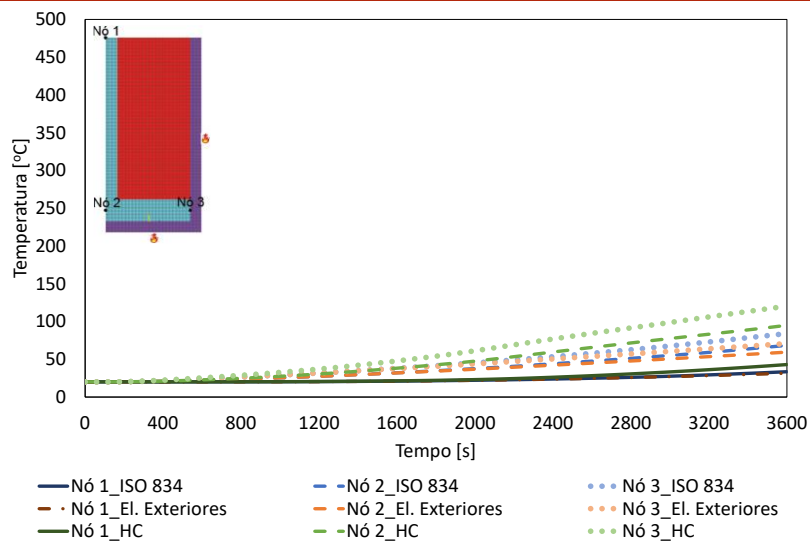
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

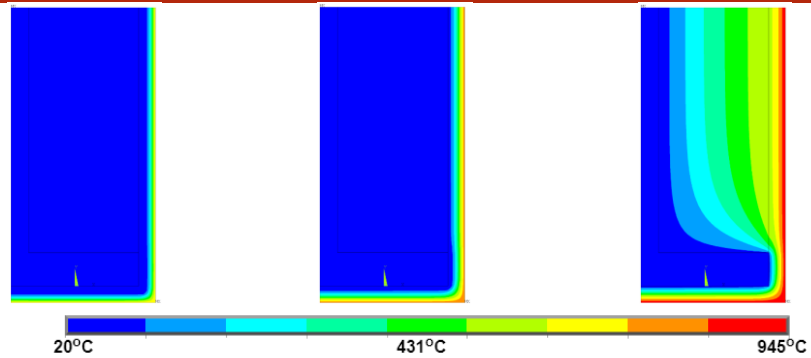
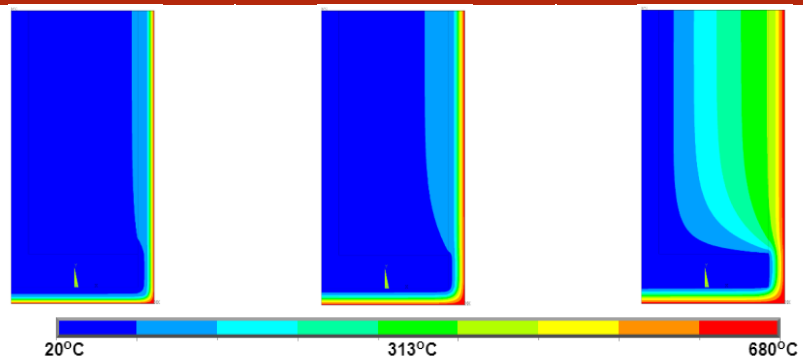


900 segundos

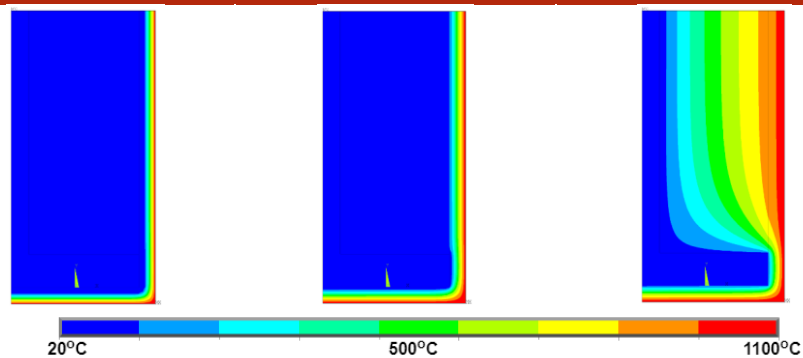
1800 segundos

3600 segundos

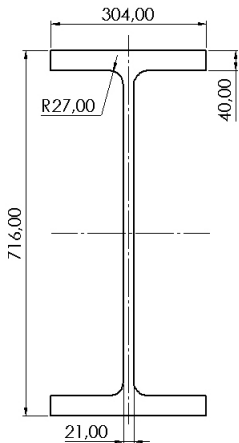
ISO 834

Elementos
Exteriores

Hidrocarbonetos

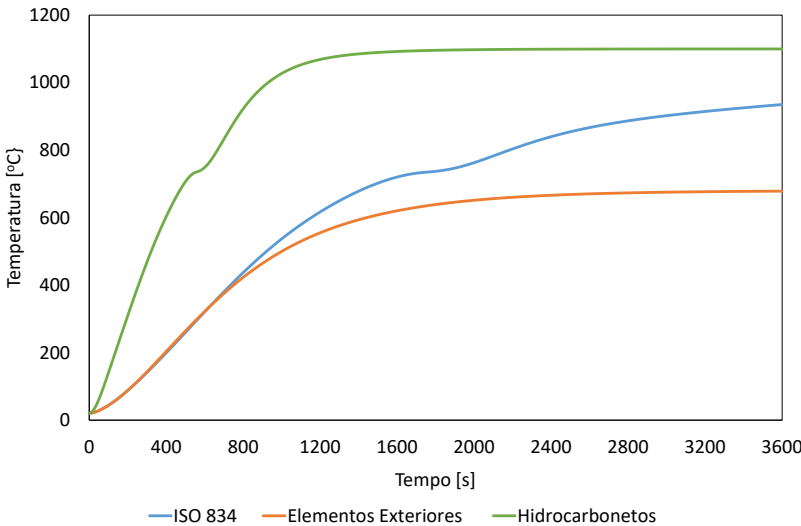


HEM 700

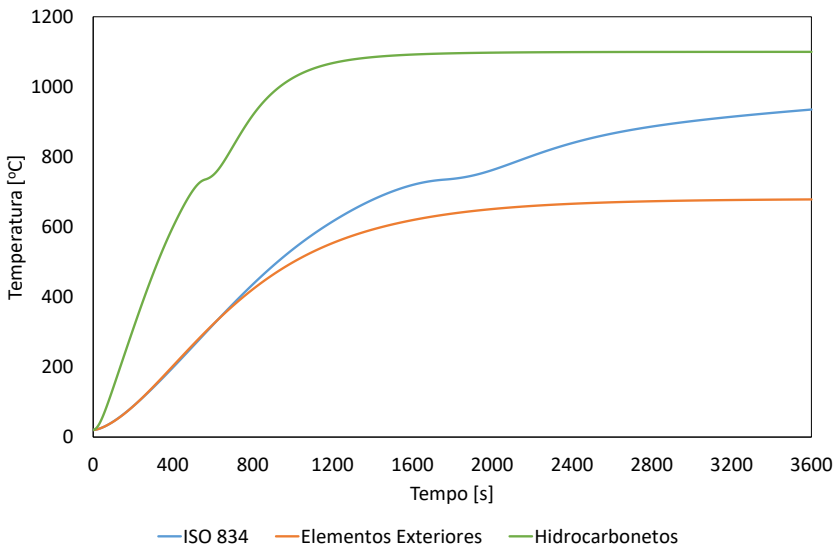


Perímetro [m]	2,5596
Área [m²]	0,0383
Fator de massividade [m ⁻¹]	66,83
Comprimento Característico [m]	0,0149

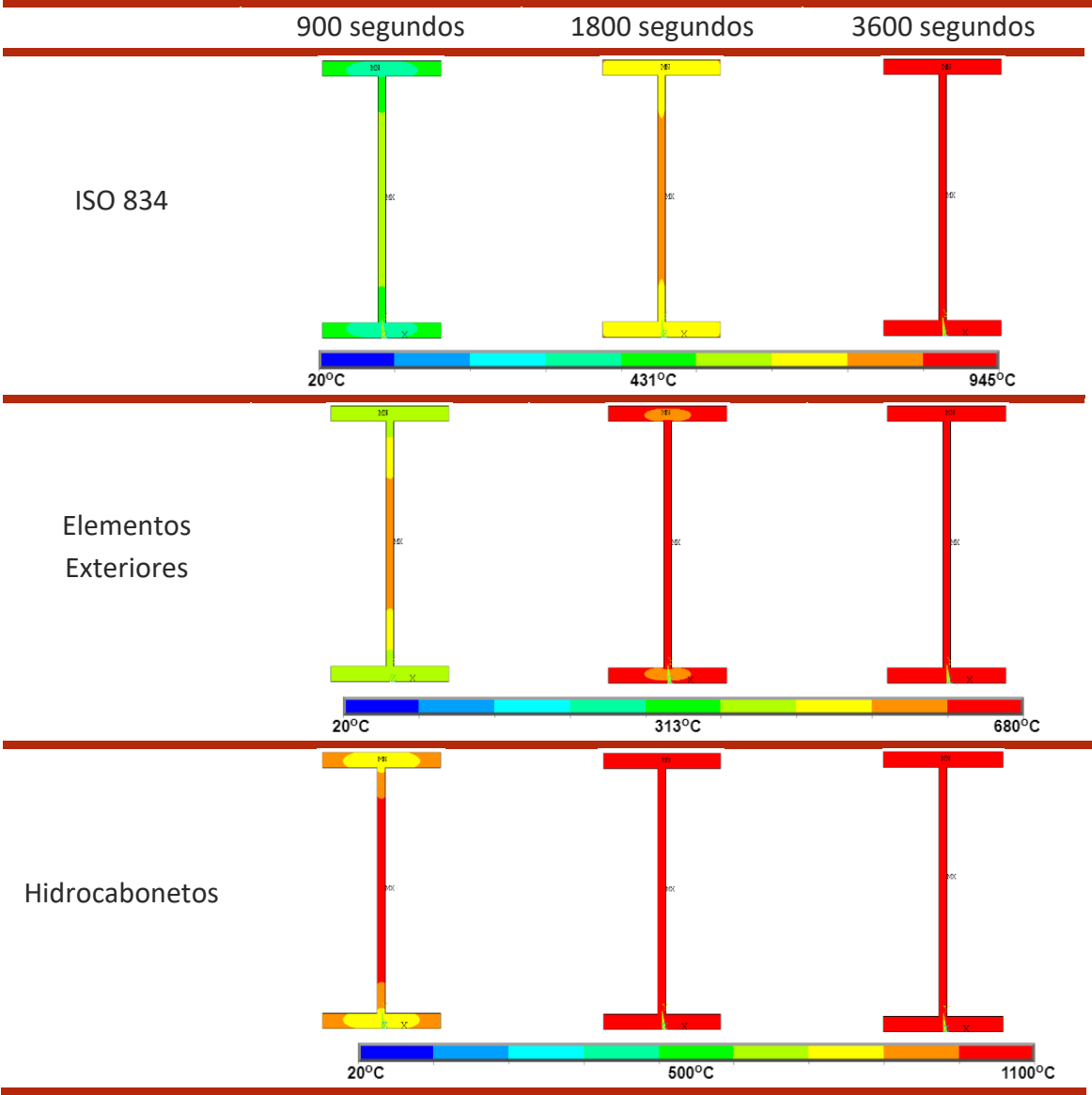
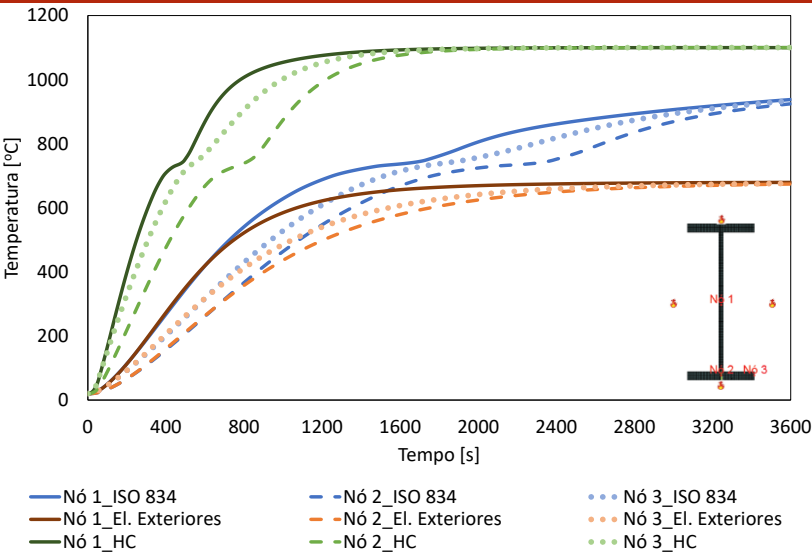
Método Simplificado do Eurocódigo 3



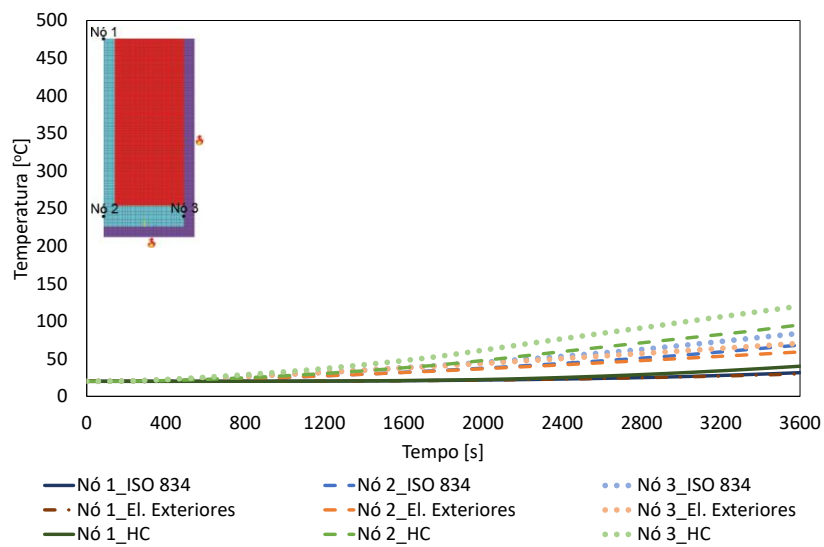
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

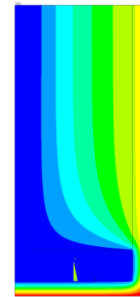
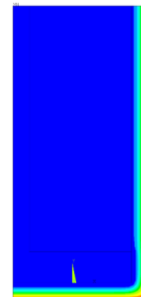
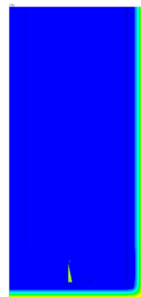


900 segundos

1800 segundos

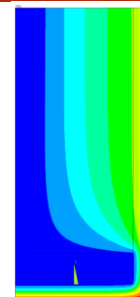
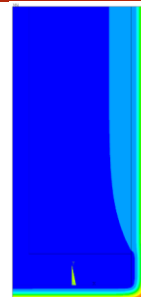
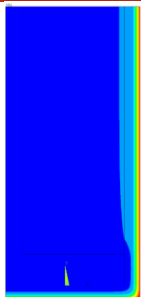
3600 segundos

ISO 834



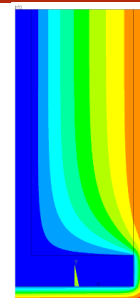
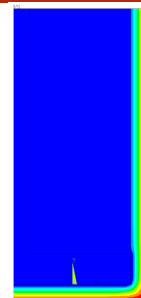
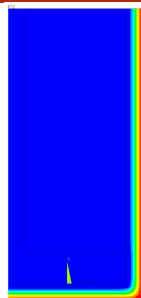
20°C 431°C 945°C

Elementos Exteriores



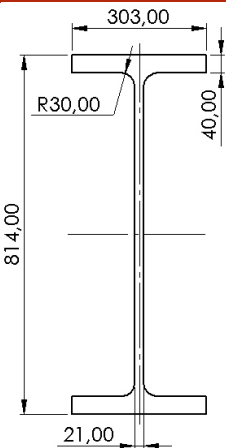
20°C 313°C 680°C

Hidrocarbonetos



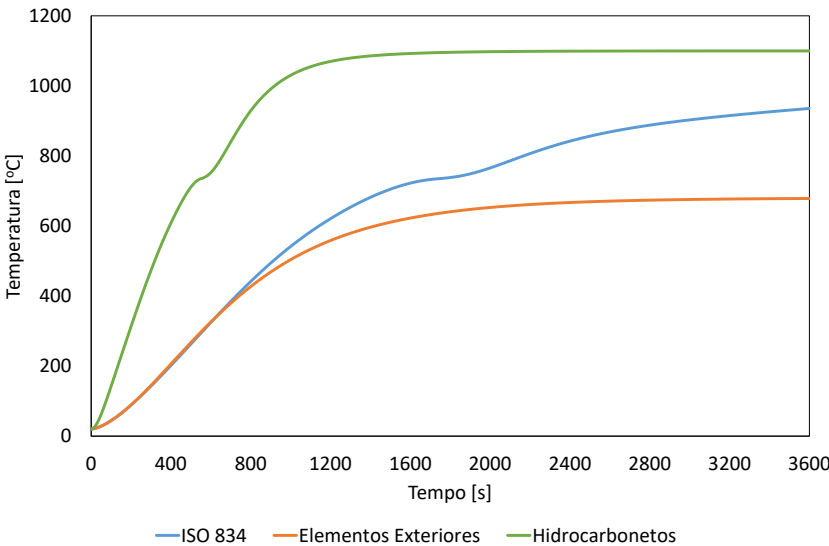
20°C 500°C 1100°C

HEM 800

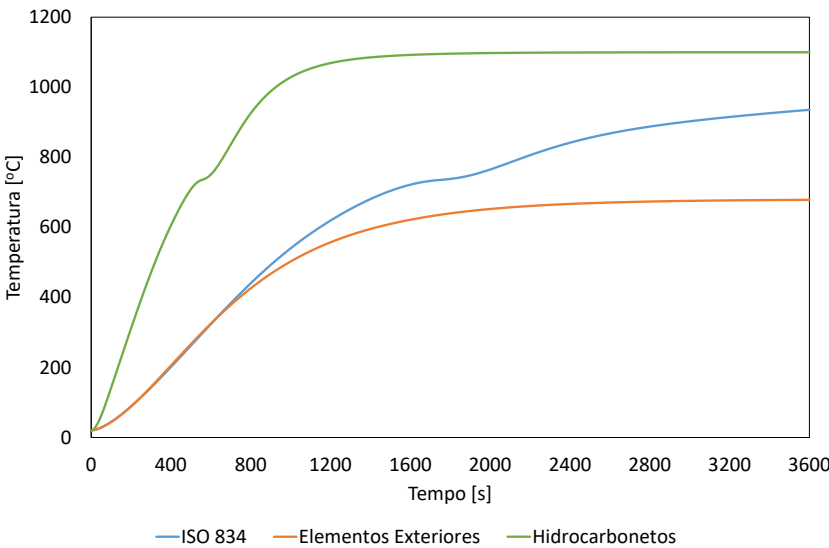


Perímetro [m]	2,7465
Área [m²]	0,04043
Fator de massividade [m ⁻¹]	67,93
Comprimento Característico [m]	0,0147

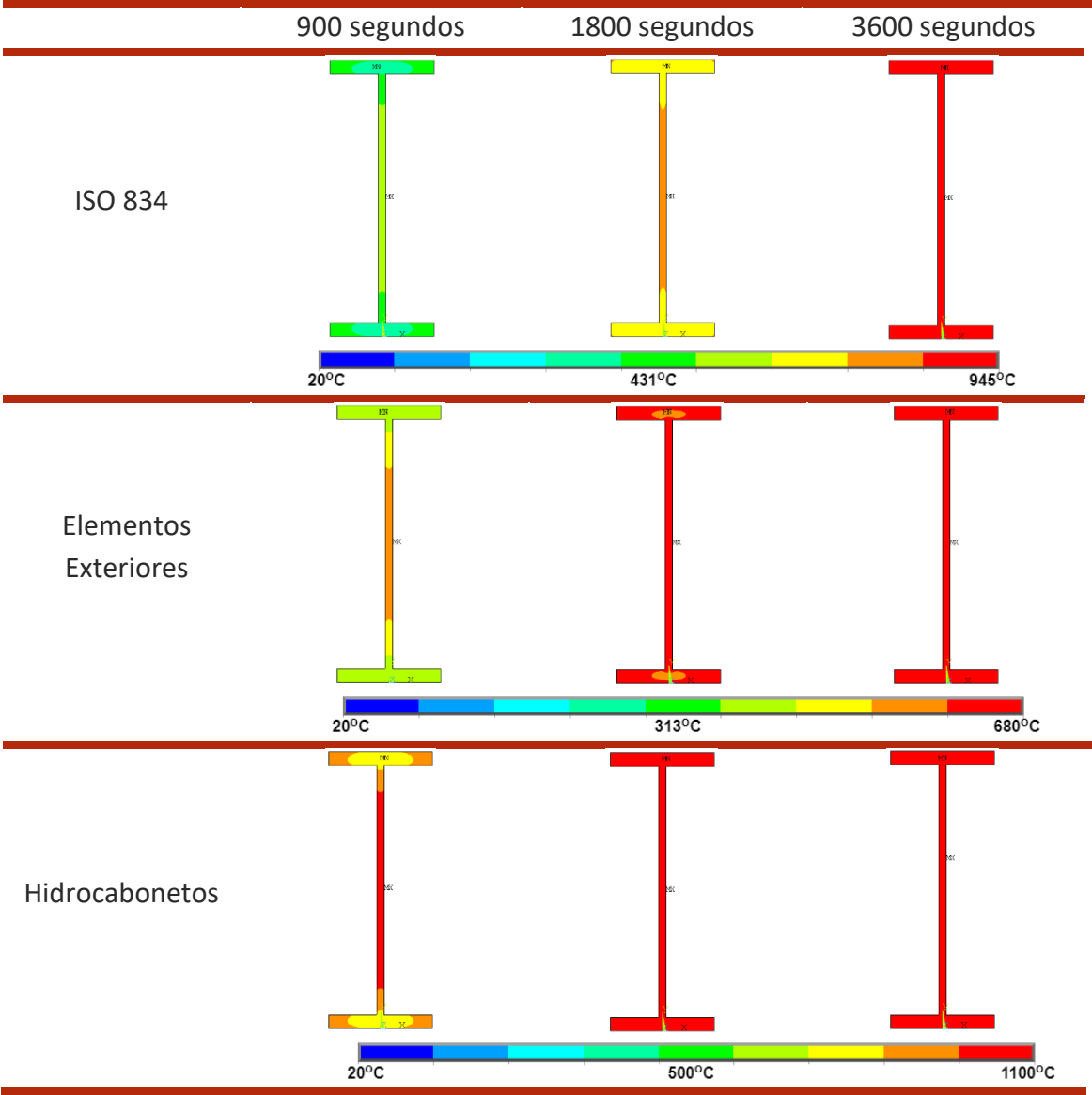
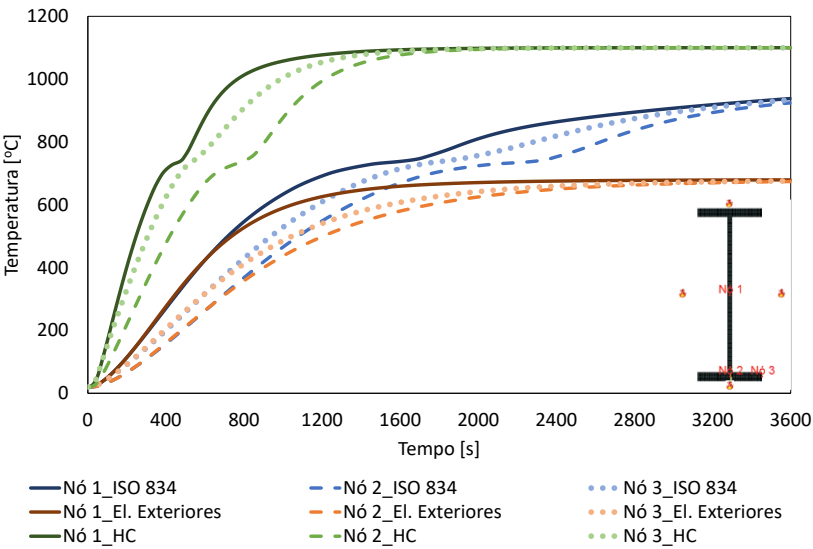
Método Simplificado do Eurocódigo 3



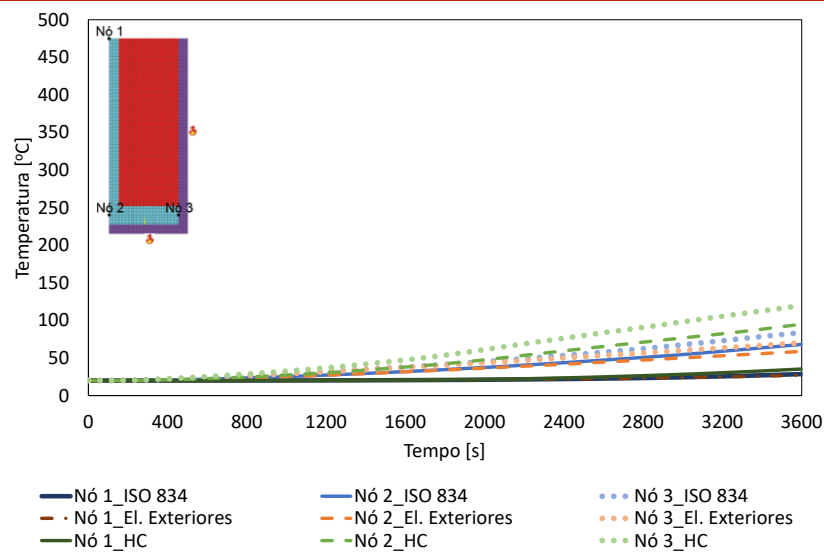
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

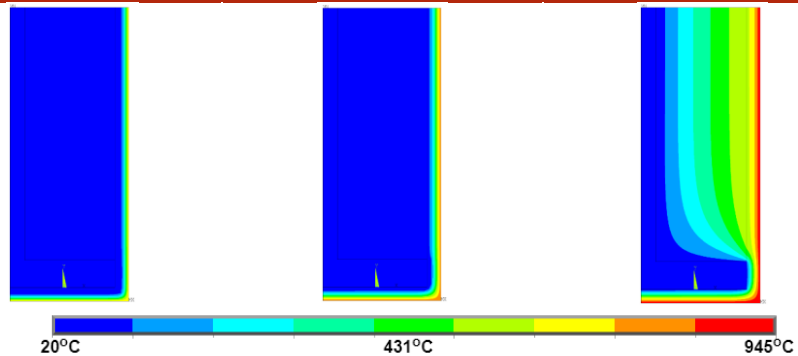
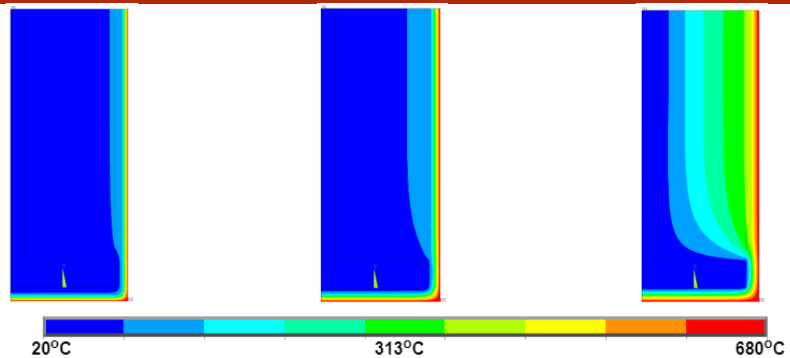


900 segundos

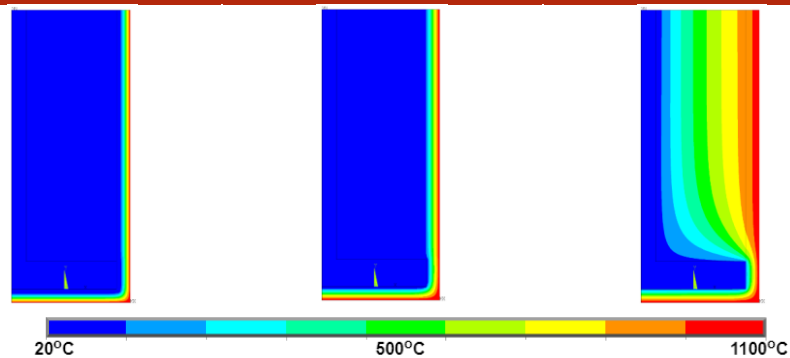
1800 segundos

3600 segundos

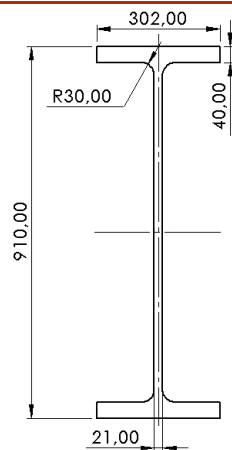
ISO 834

Elementos
Exteriores

Hidrocarbonetos

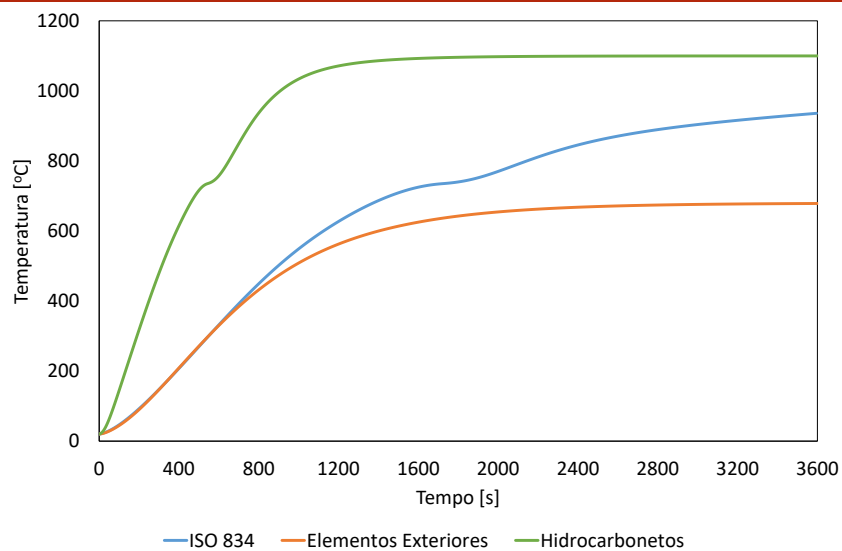


HEM 900

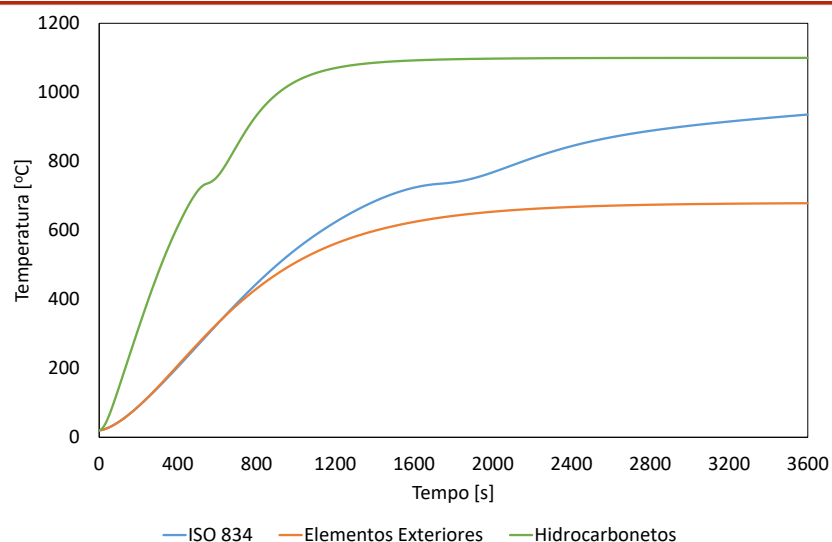


Perímetro [m]	2,9344
Área [m ²]	0,04246
Fator de massividade [m ⁻¹]	69,27
Comprimento Característico [m]	0,0144

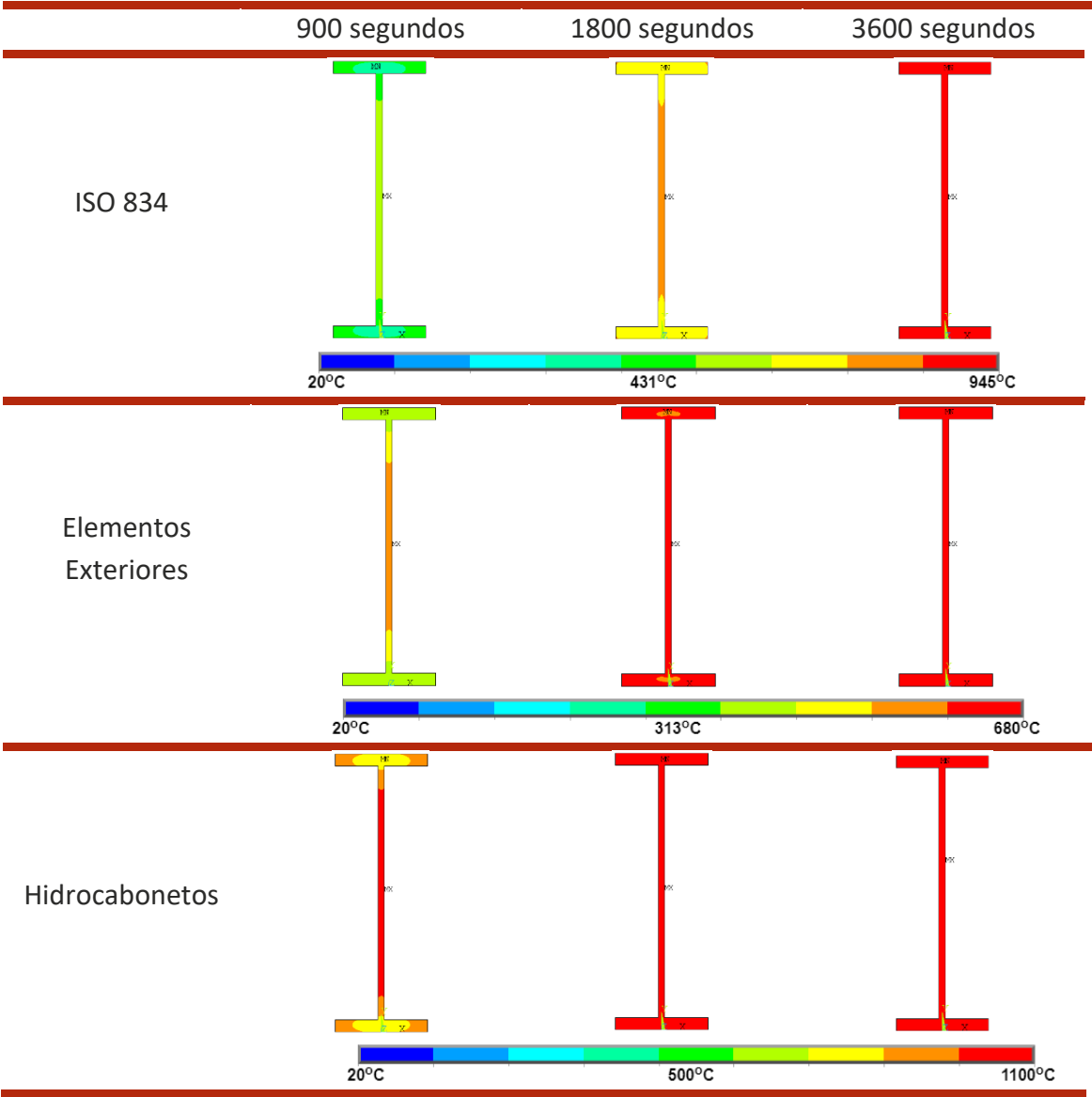
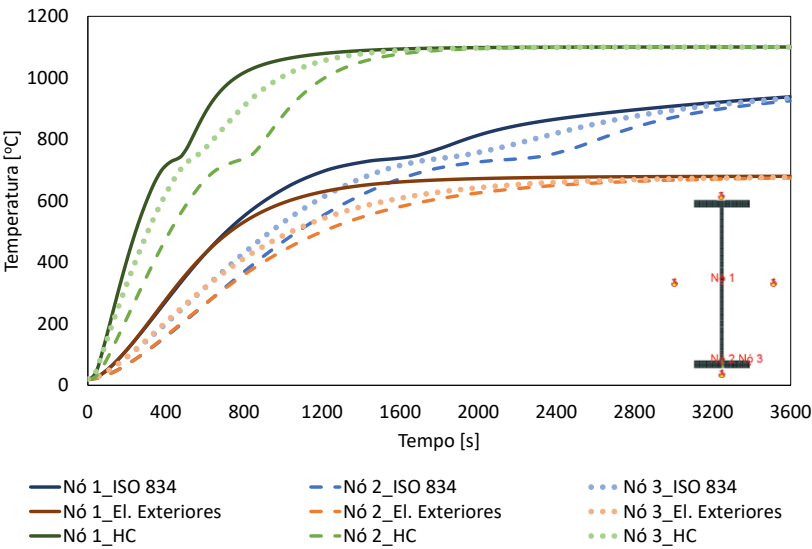
Método Simplificado do Eurocódigo 3



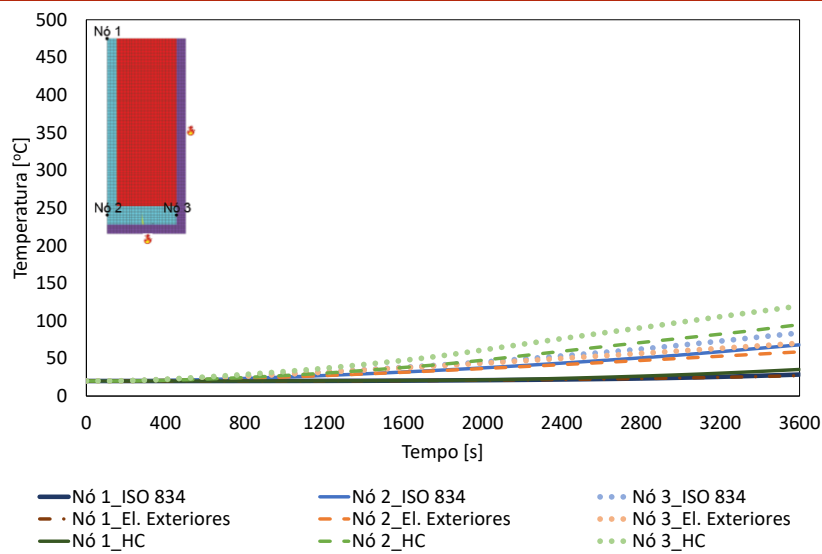
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

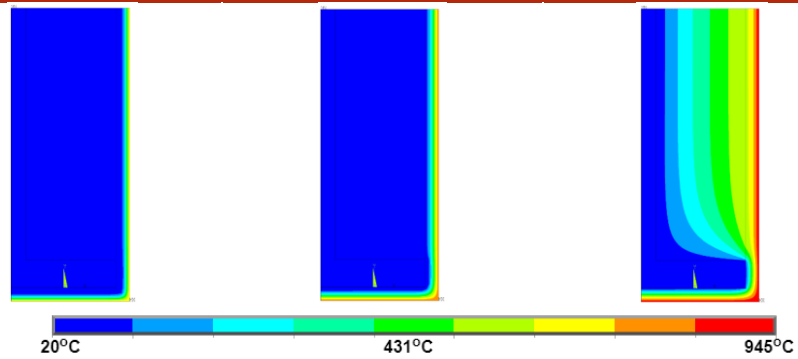
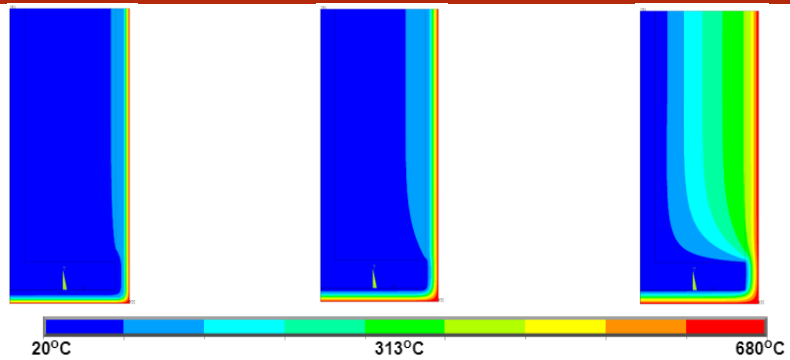


900 segundos

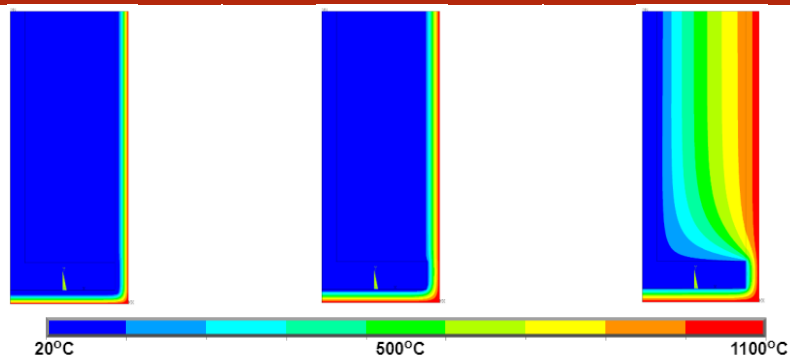
1800 segundos

3600 segundos

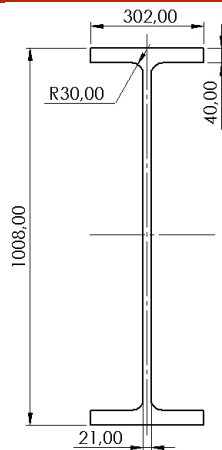
ISO 834

Elementos
Exteriores

Hidrocabonetos



HEM 1000



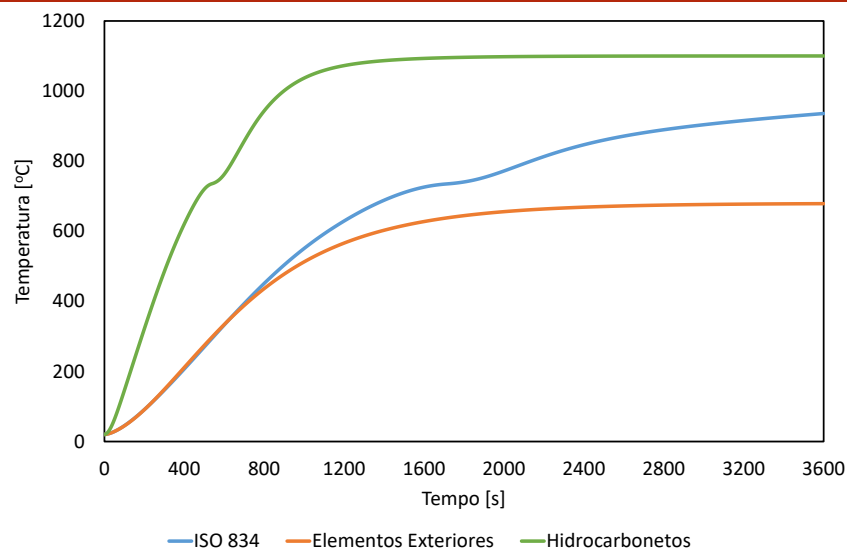
Perímetro [m] 3,1305

Área [m²] 0,04442

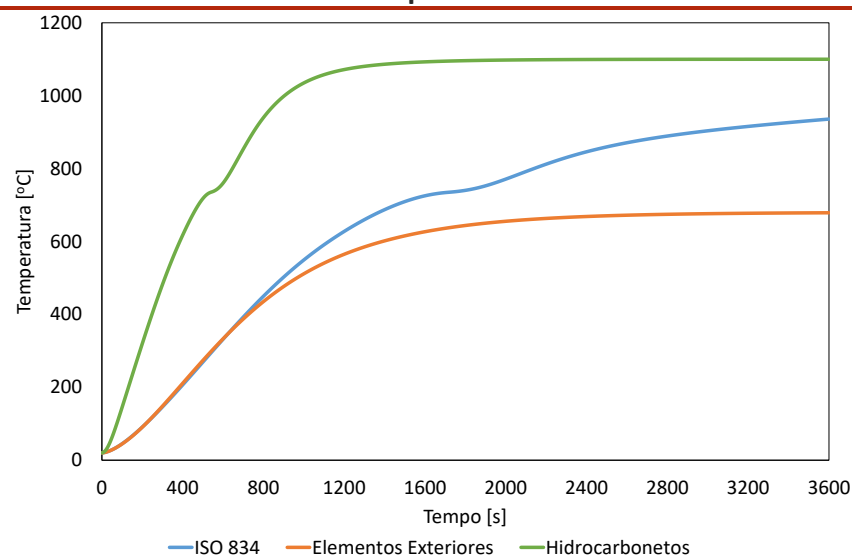
Fator de
massividade [m⁻¹] 70,47

Comprimento
Característico [m] 0,0142

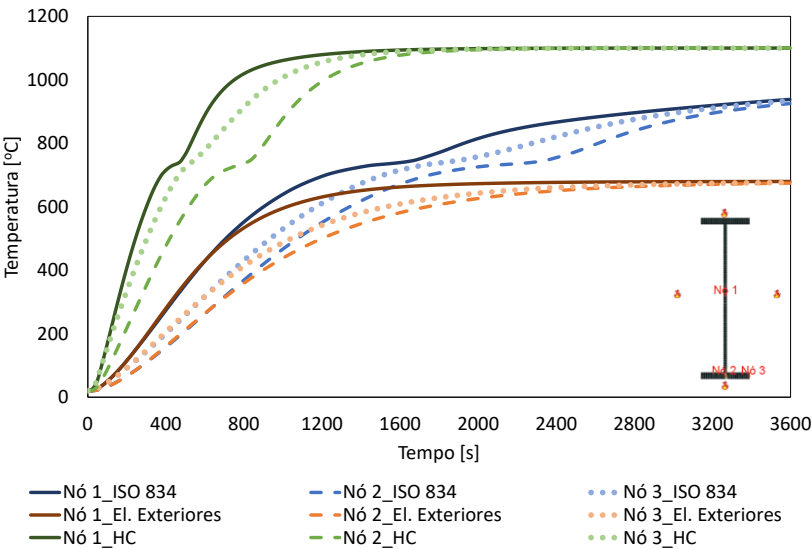
Método Simplificado do Eurocódigo 3



Método da Capacitância Global

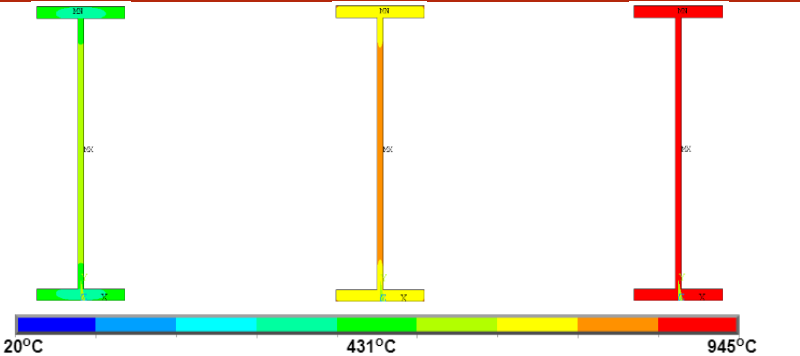


Método Numérico (Perfil Não Protegido)

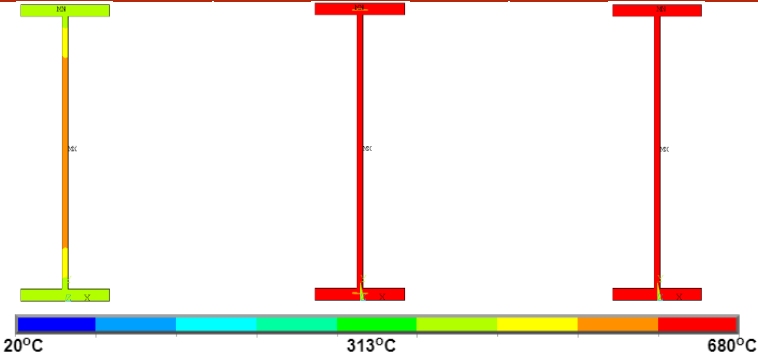


900 segundos 1800 segundos 3600 segundos

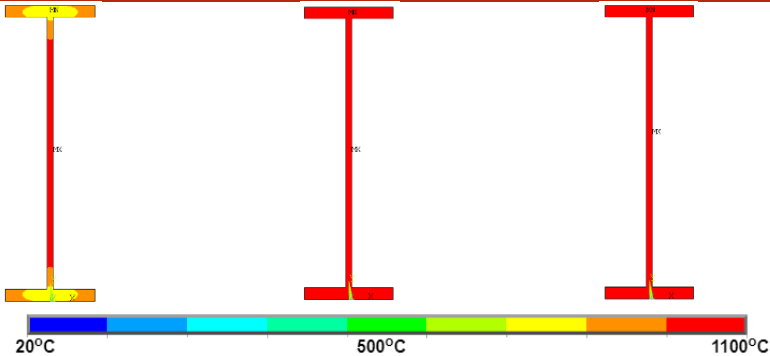
ISO 834



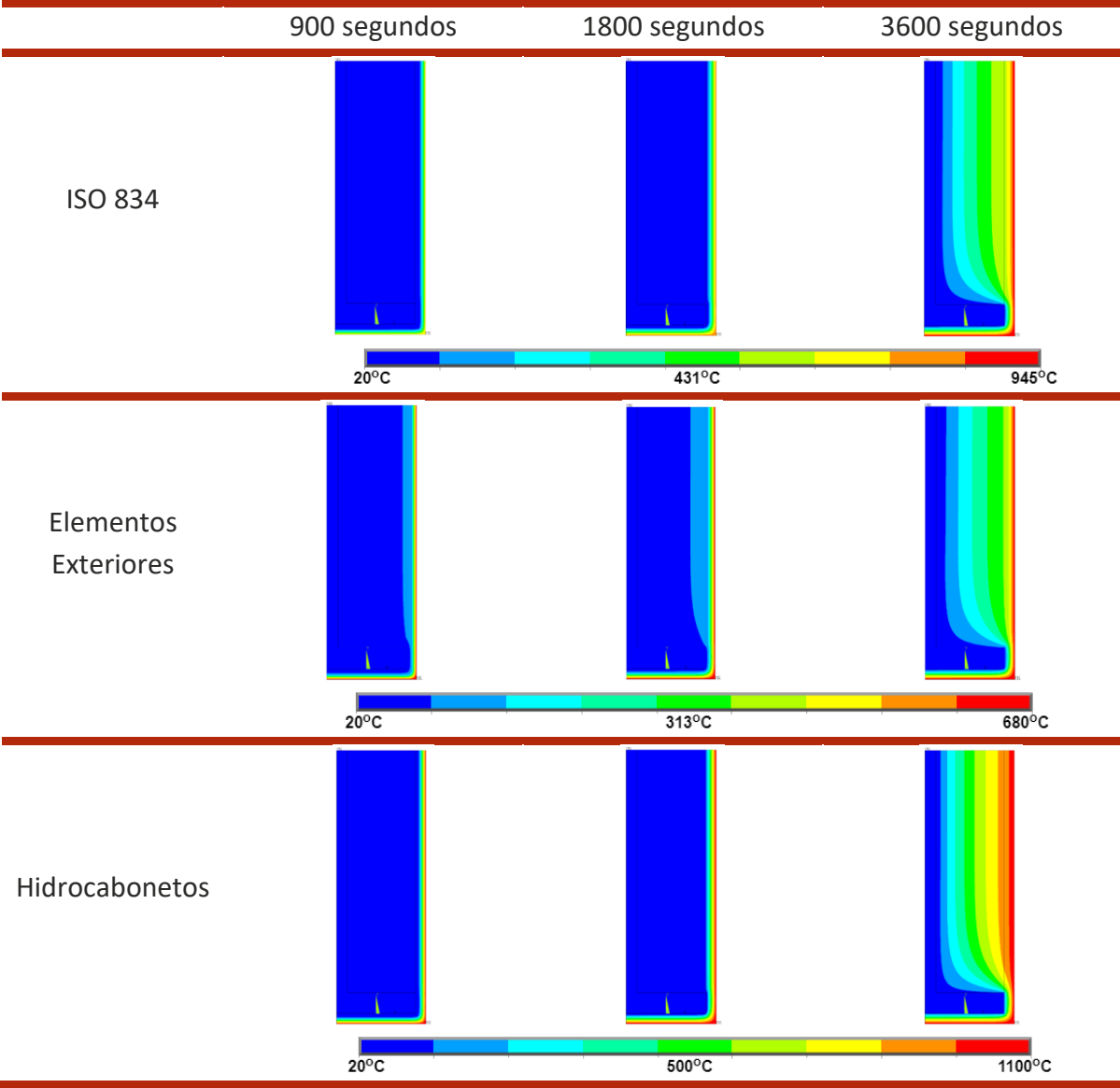
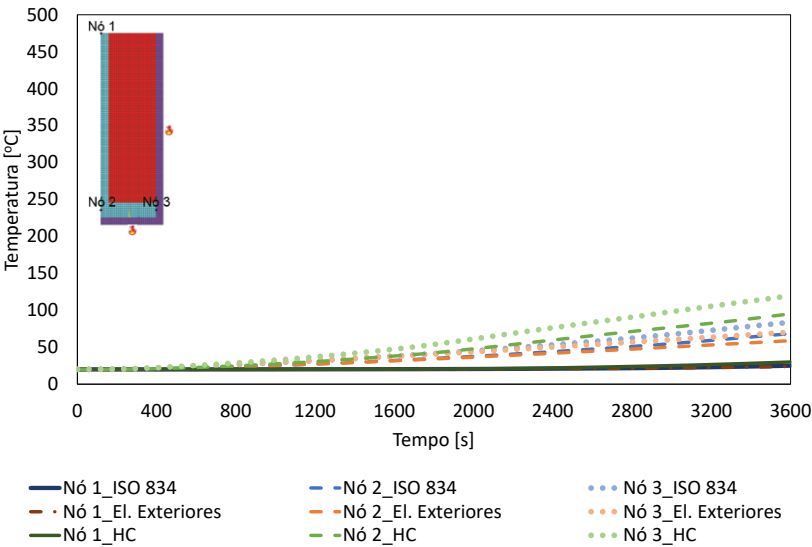
Elementos Exteriores



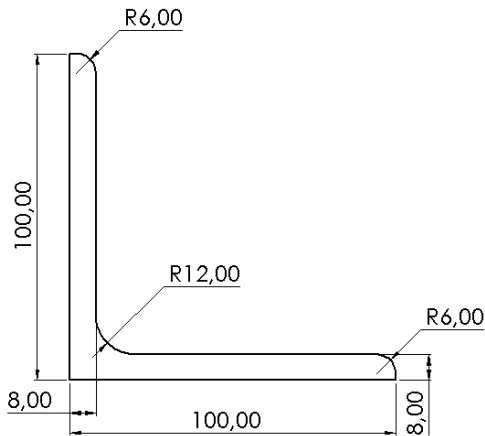
Hidrocarbonetos



Método Numérico (Perfil Protegido)

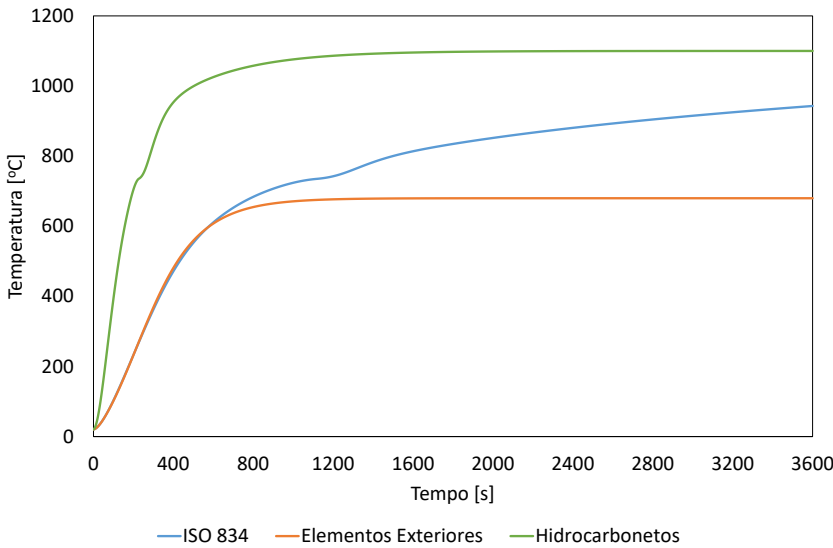


L 100x100x8

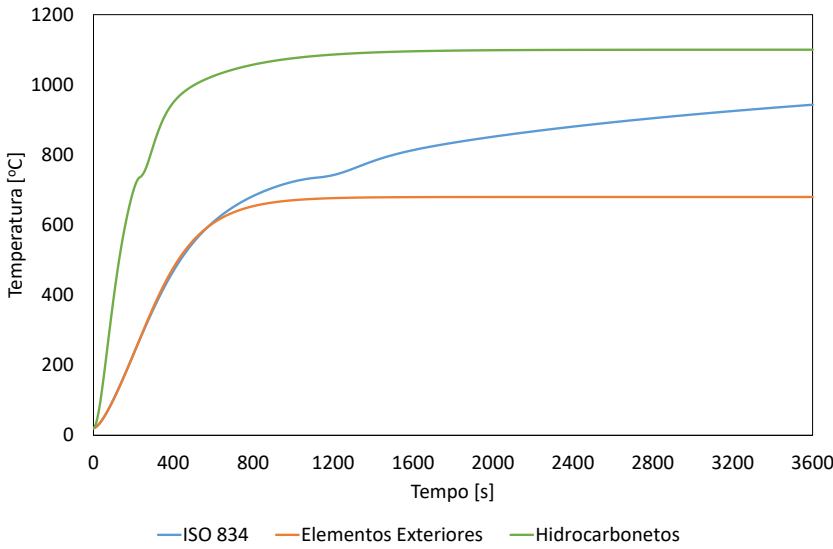


Perímetro [m]	0,39627
Área [m²]	0,001551
Fator de massividade [m ⁻¹]	255,50
Comprimento Característico [m]	0,0039

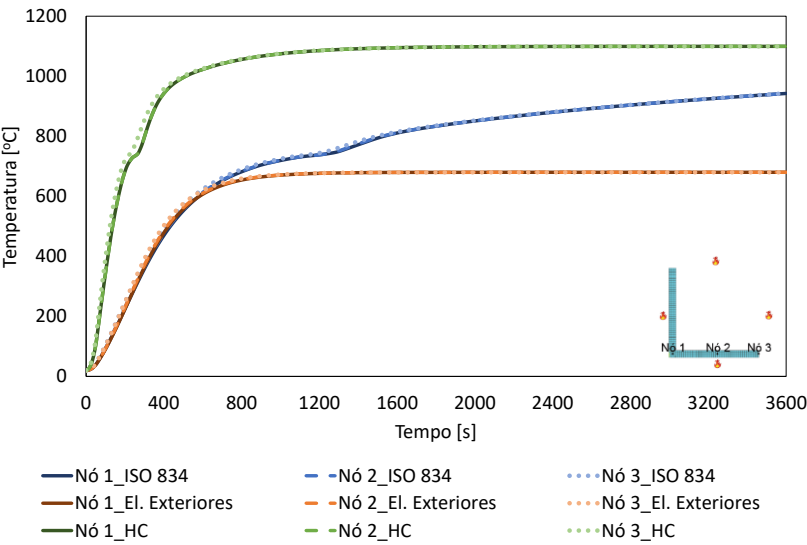
Método Simplificado do Eurocódigo 3



Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)

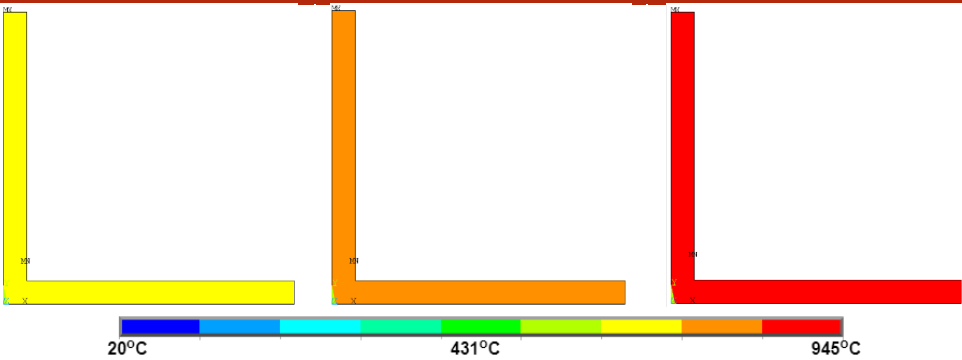


900 segundos

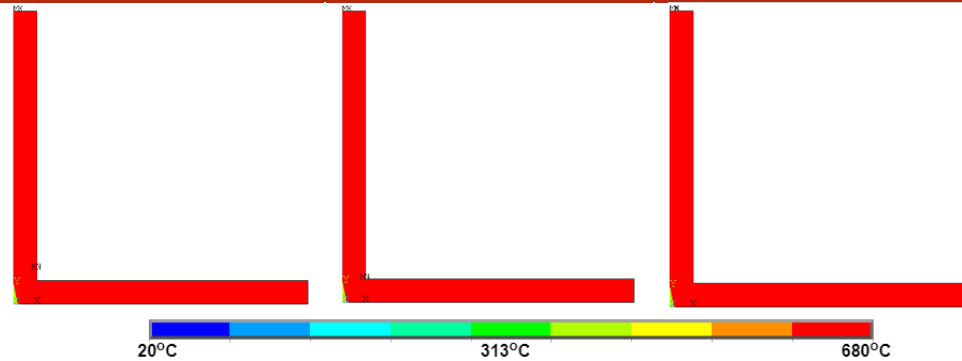
1800 segundos

3600 segundos

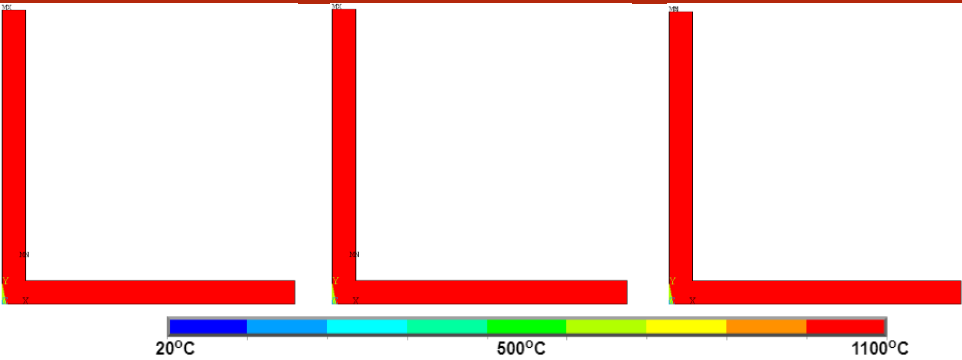
ISO 834



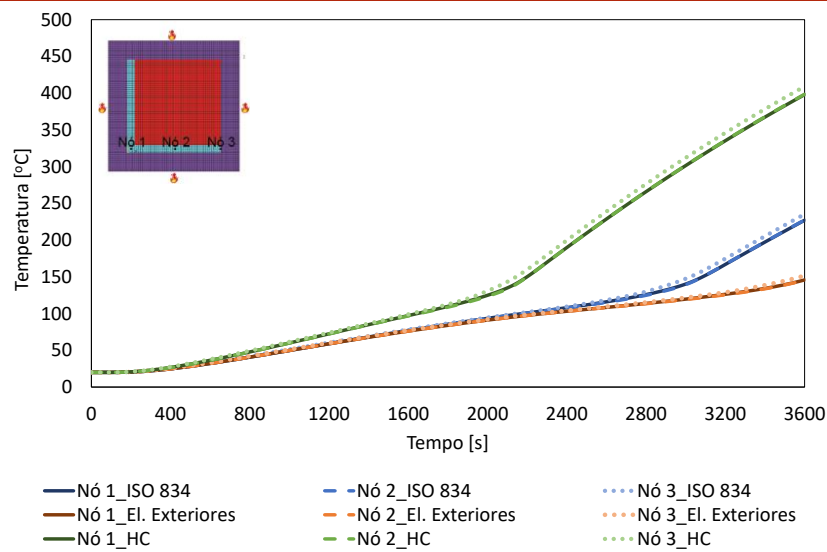
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos



Método Numérico (Perfil Protegido)

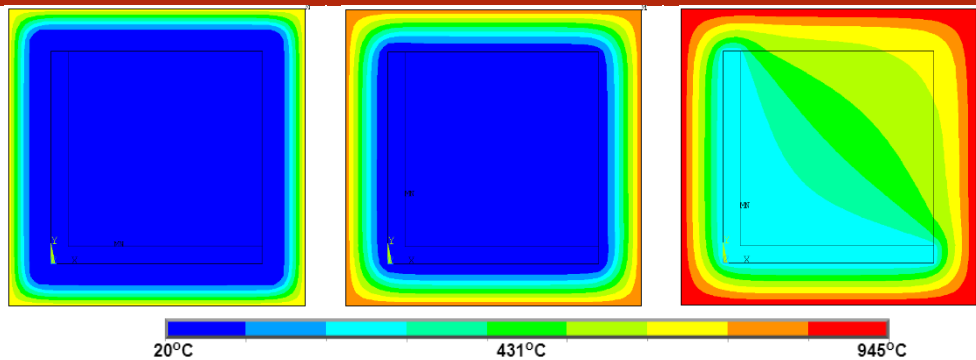


900 segundos

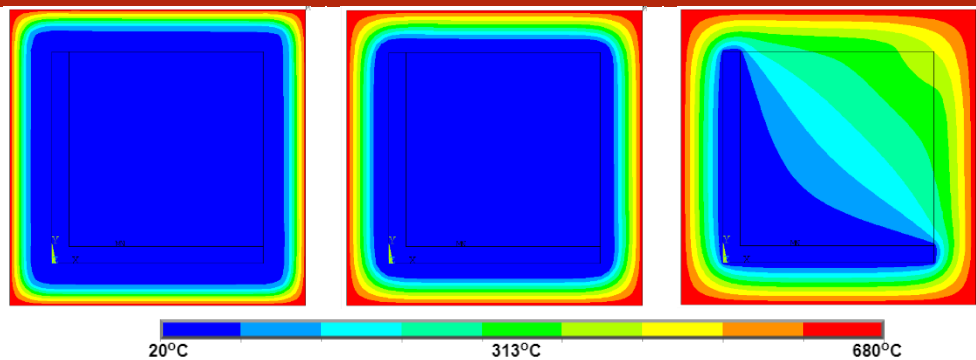
1800 segundos

3600 segundos

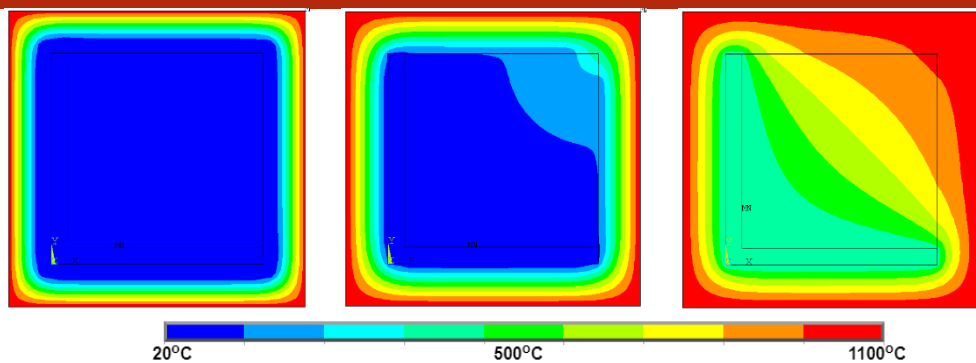
ISO 834



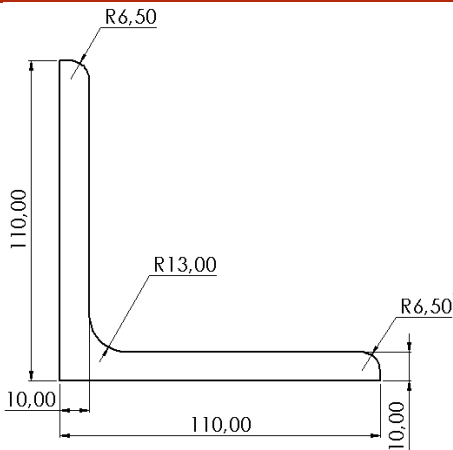
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

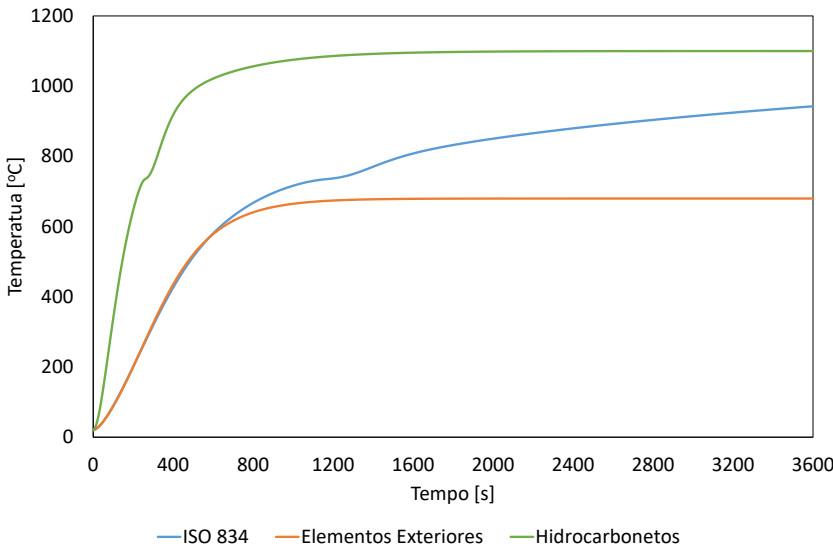


L 110x110x10

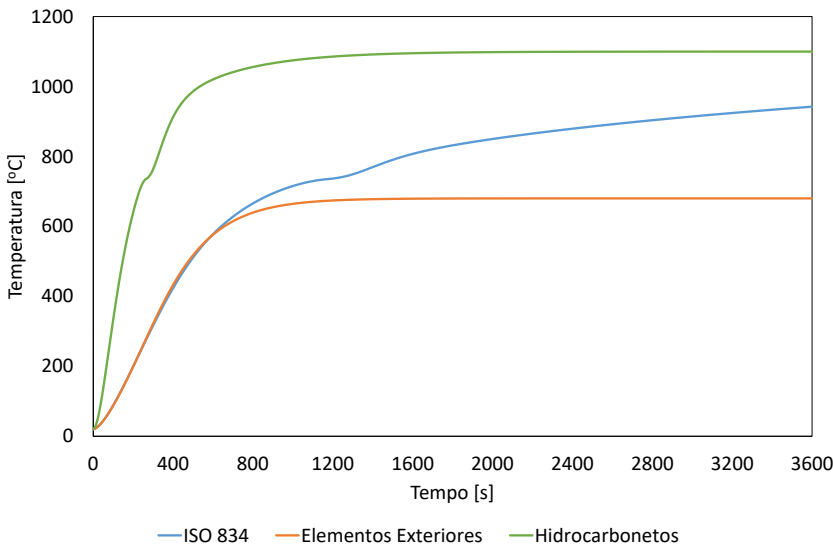


Perímetro [m]	0,43863
Área [m²]	0,002118
Fator de massividade [m ⁻¹]	207,09
Comprimento Característico [m]	0,0048

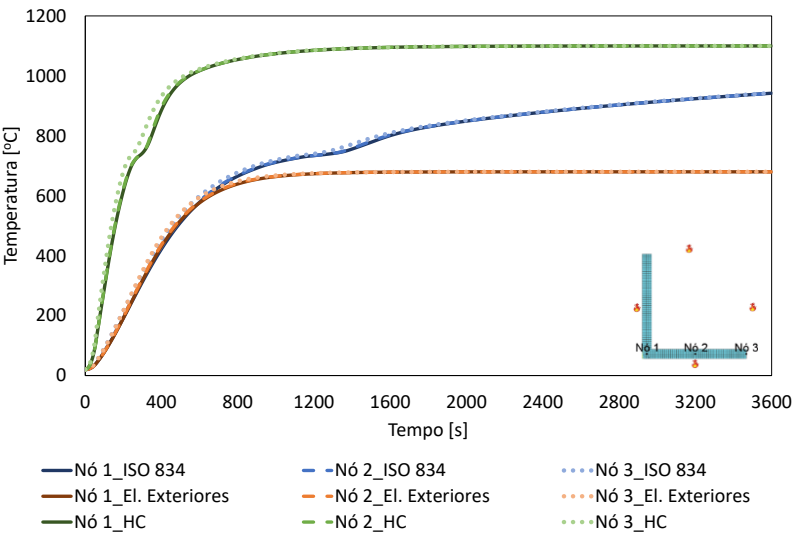
Método Simplificado do Eurocódigo 3



Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)

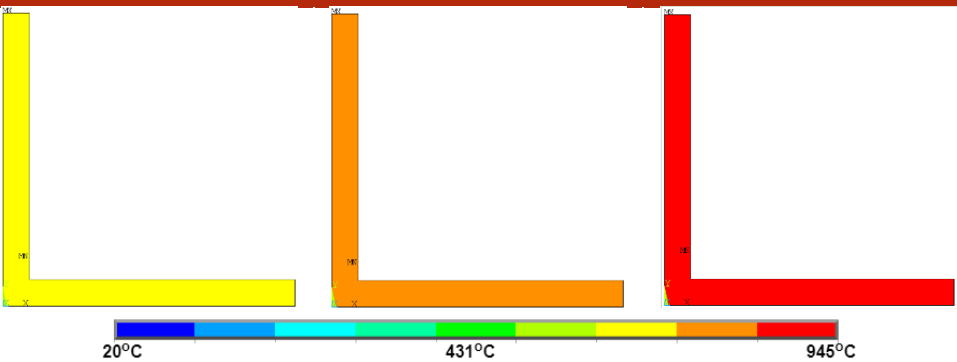


900 segundos

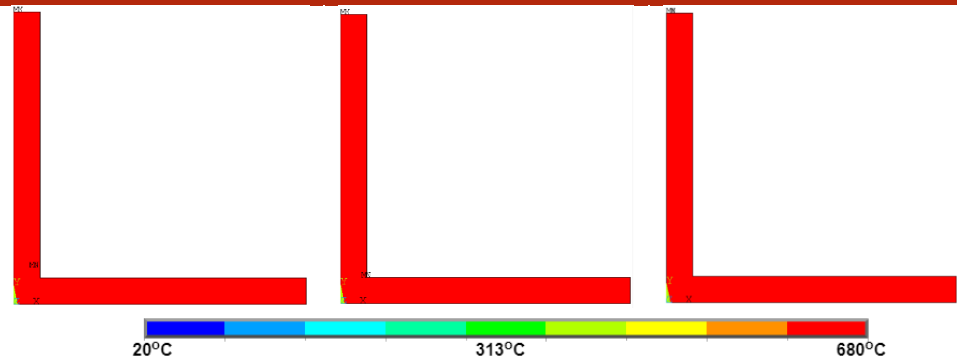
1800 segundos

3600 segundos

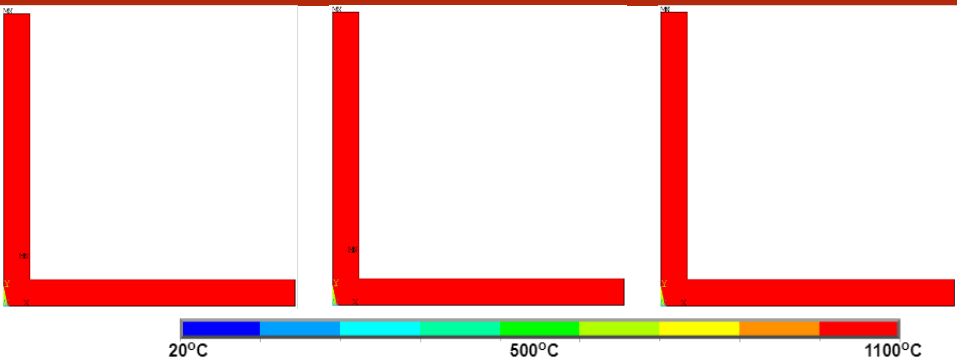
ISO 834



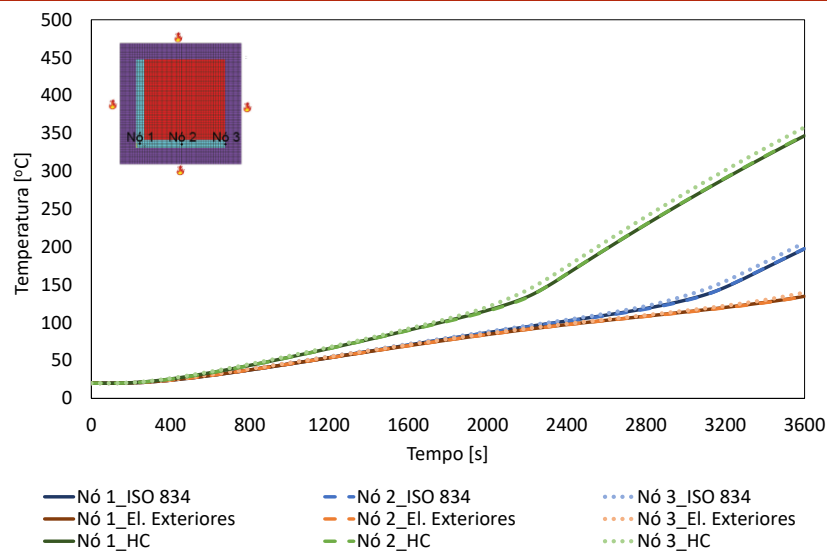
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos



Método Numérico (Perfil Protegido)

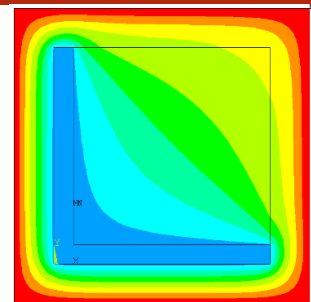
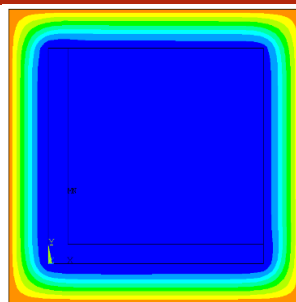
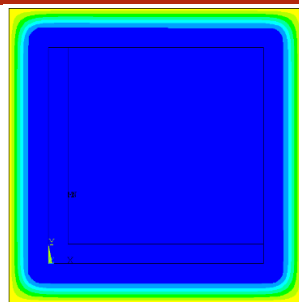


900 segundos

1800 segundos

3600 segundos

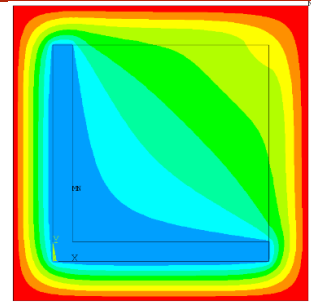
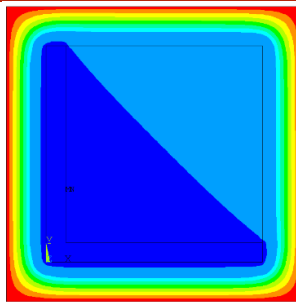
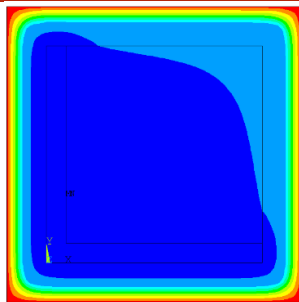
ISO 834



20°C

431°C

945°C

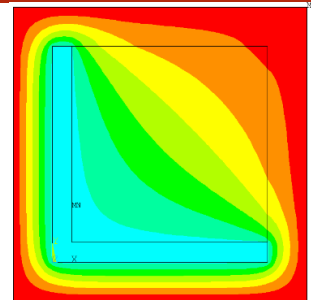
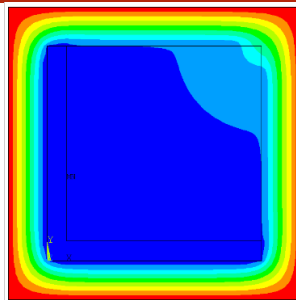
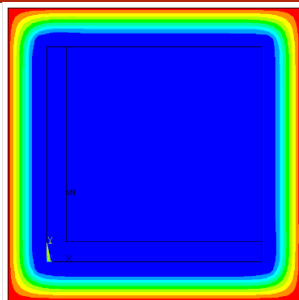
Elementos
Exteriores

20°C

313°C

680°C

Hidrocarbonetos

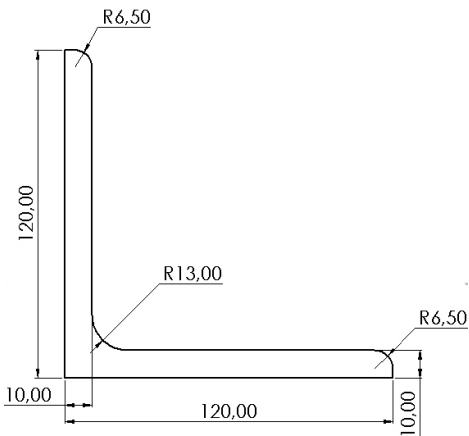


20°C

500°C

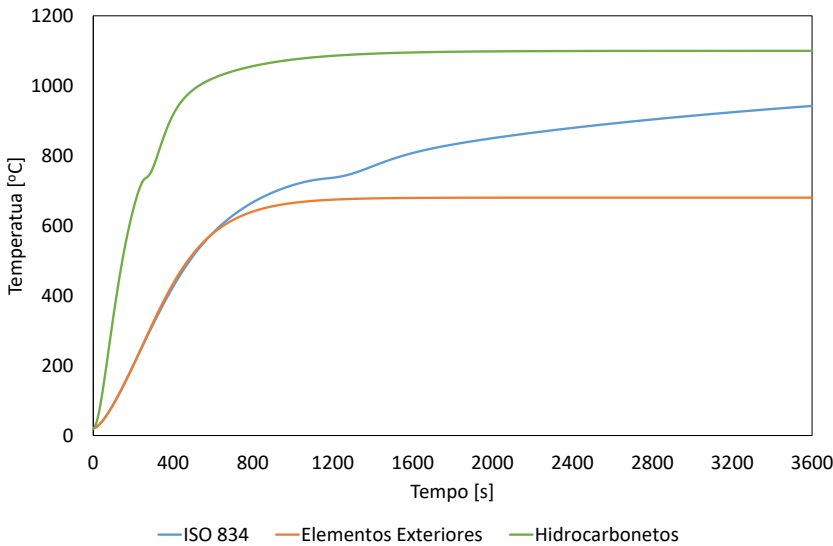
1100°C

L 120x120x10

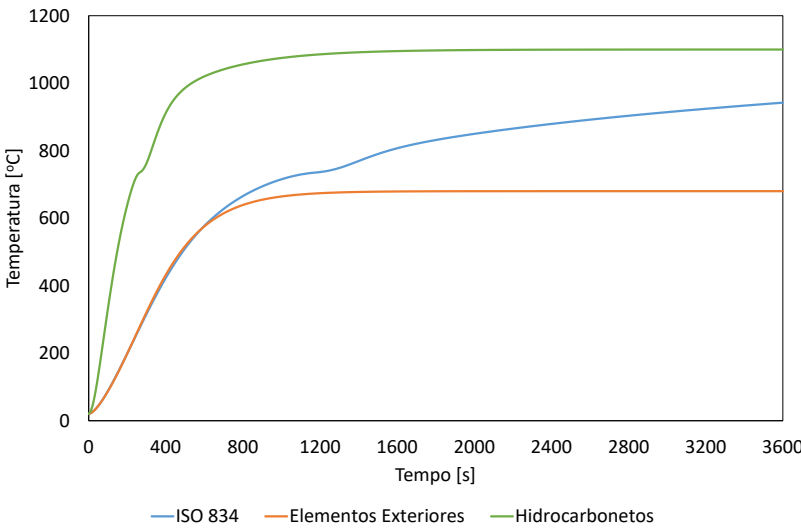


Perímetro [m]	0,47863
Área [m ²]	0,002318
Fator de massividade [m ⁻¹]	206,48
Comprimento Característico [m]	0,0049

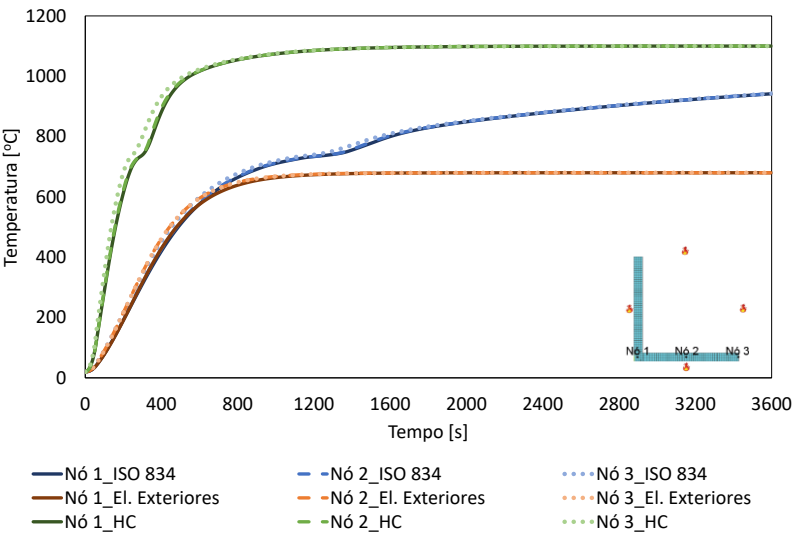
Método Simplificado do Eurocódigo 3



Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)

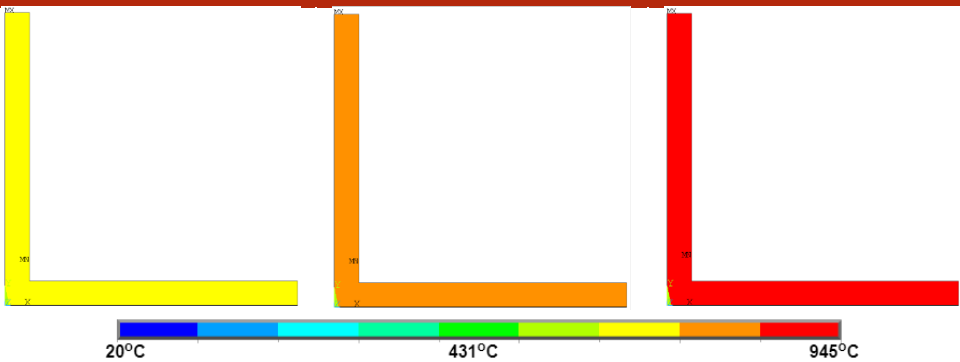


900 segundos

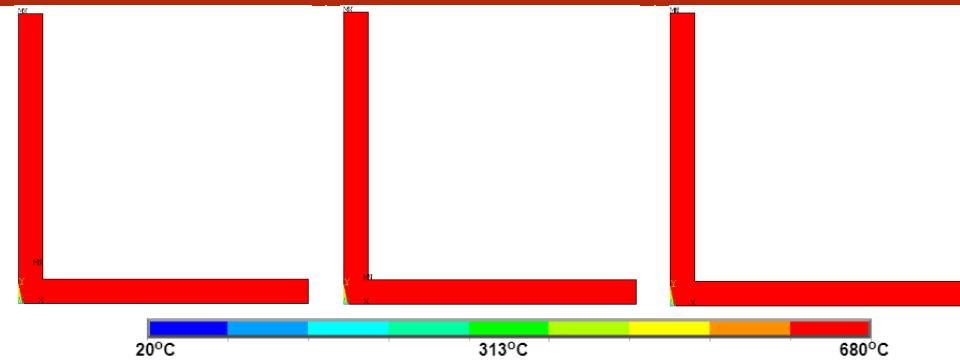
1800 segundos

3600 segundos

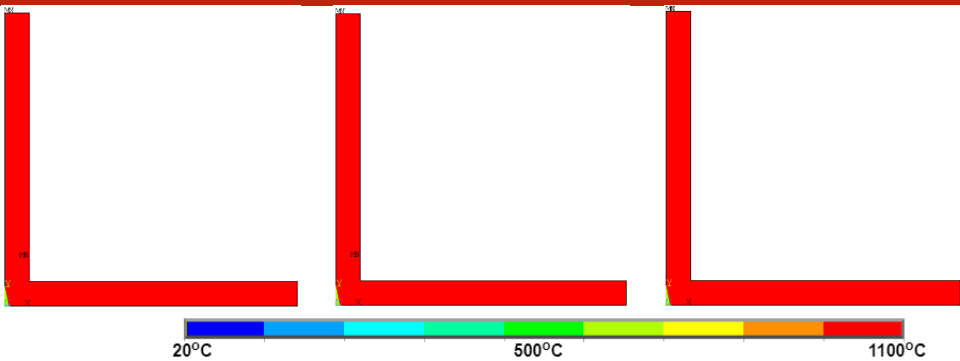
ISO 834



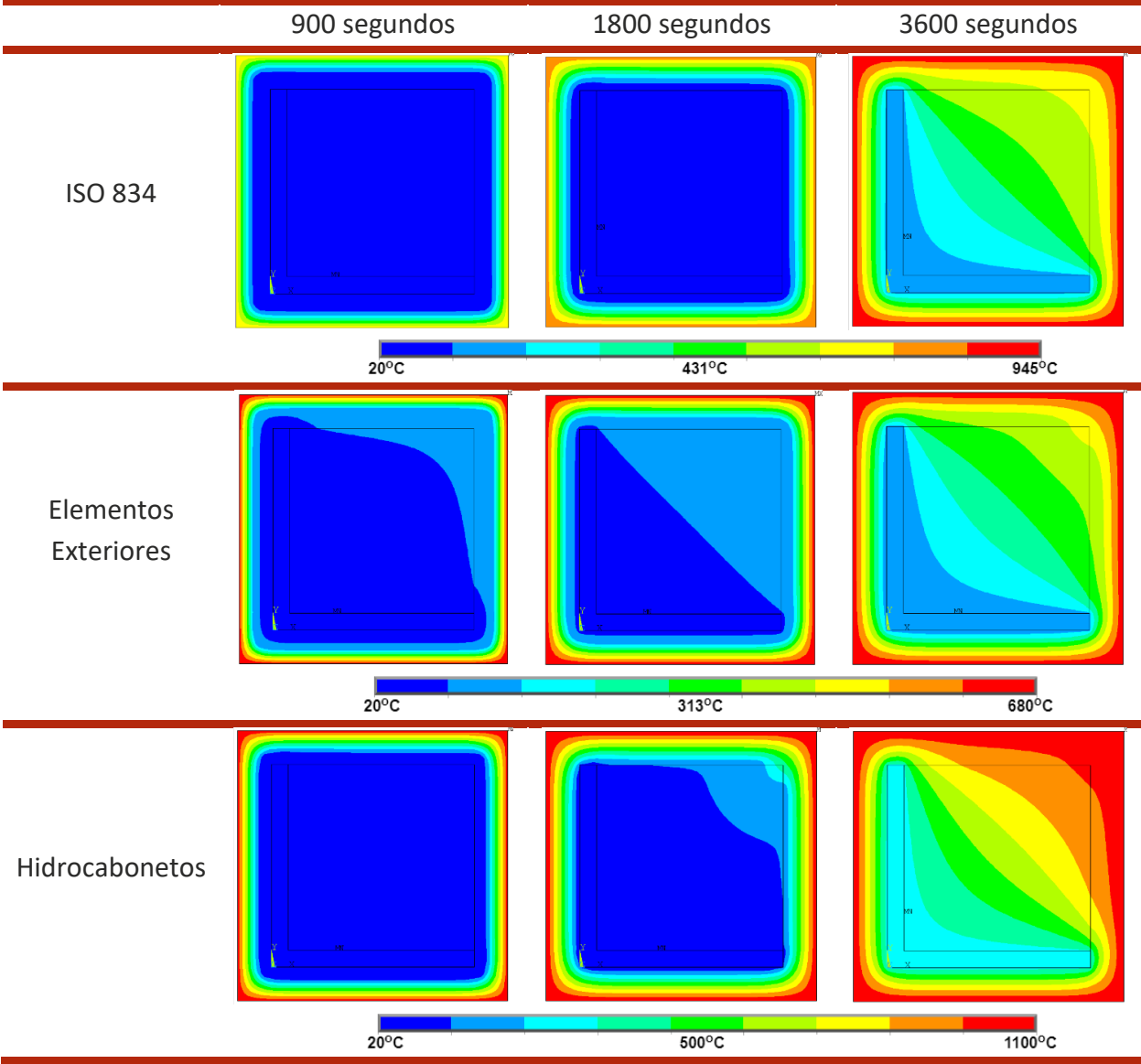
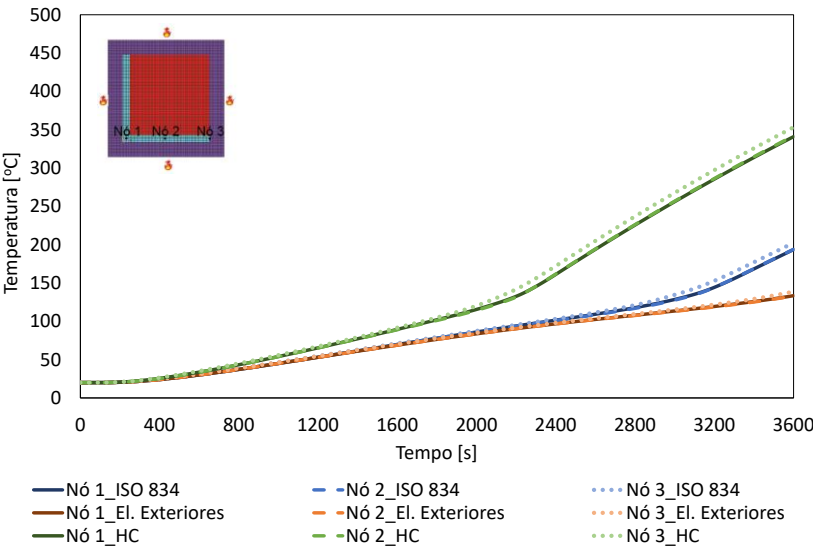
Elementos Exteriores



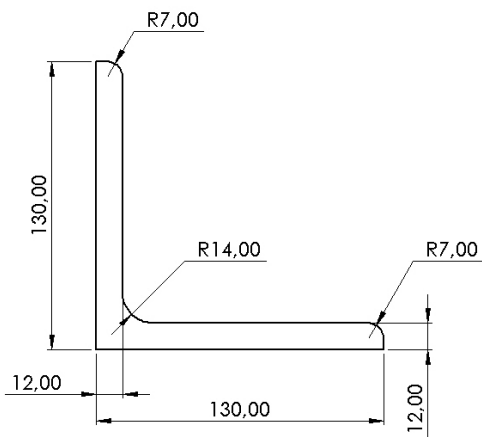
Hidrocarbonetos



Método Numérico (Perfil Protegido)

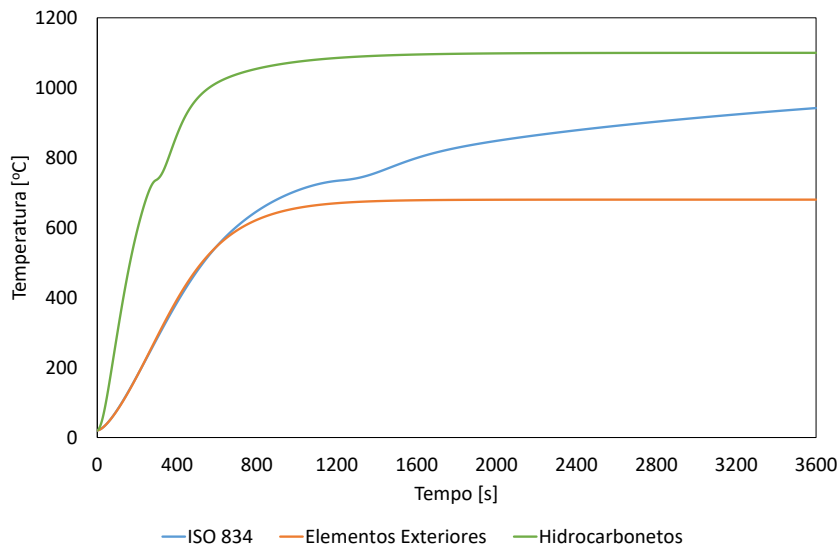


L 130x130x12

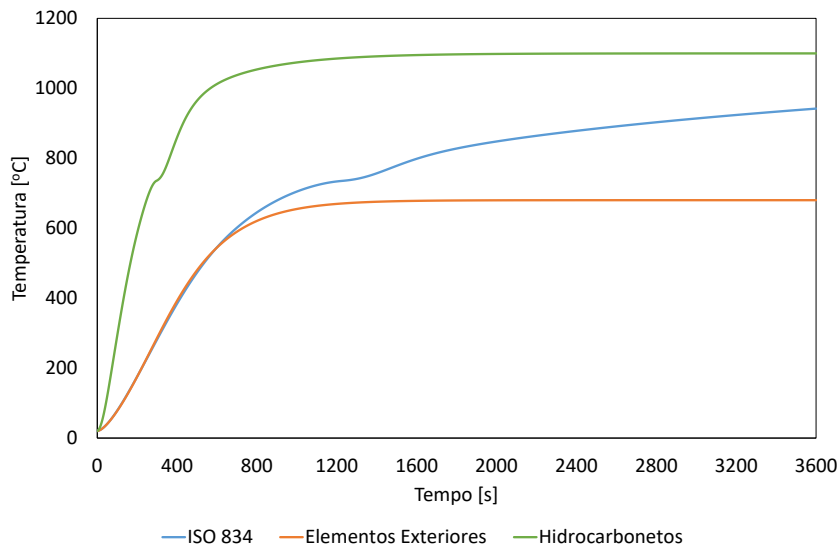


Perímetro [m]	0,52098
Área [m²]	0,003
Fator de massividade [m ⁻¹]	173,66
Comprimento Característico [m]	0,0057

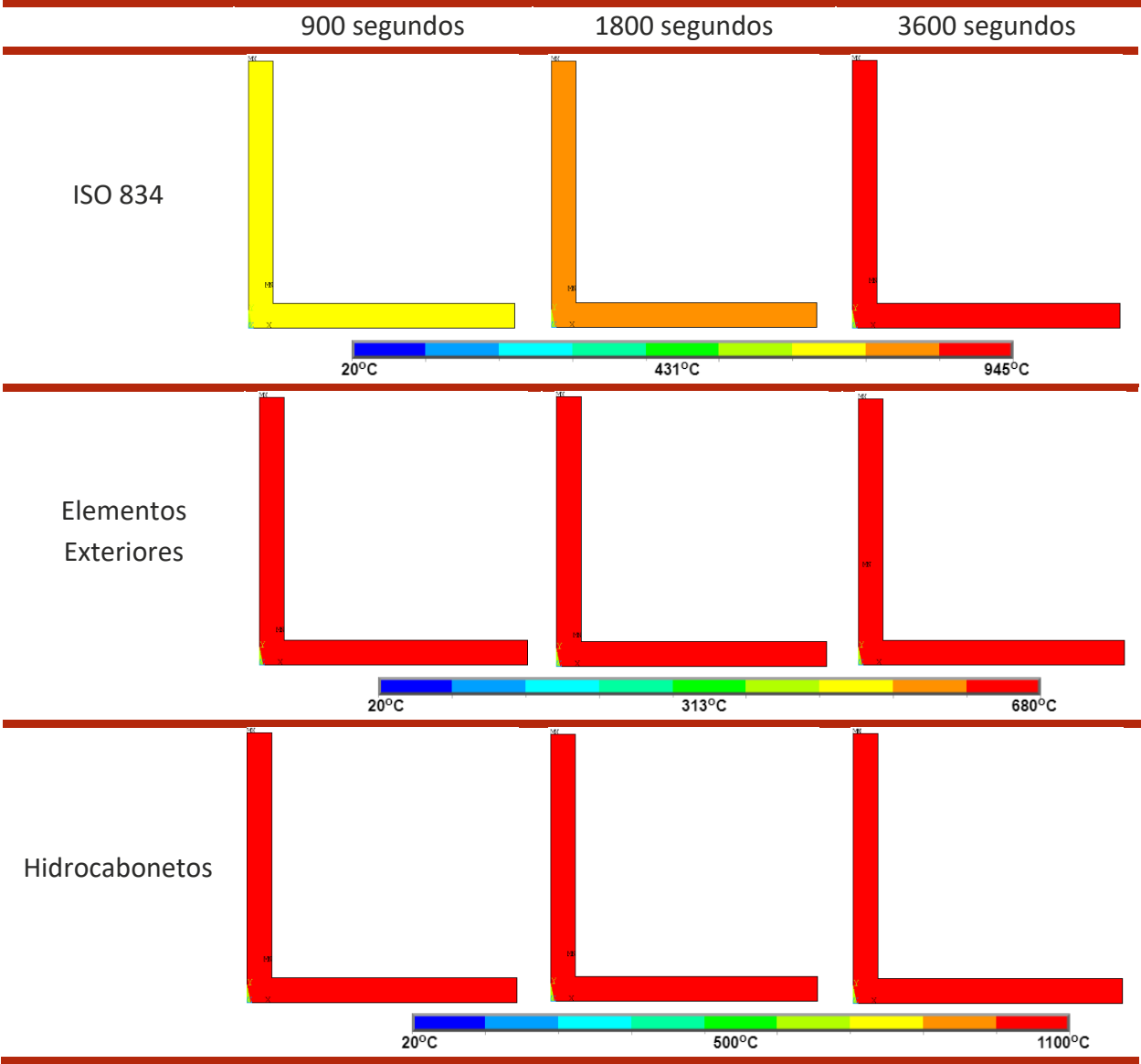
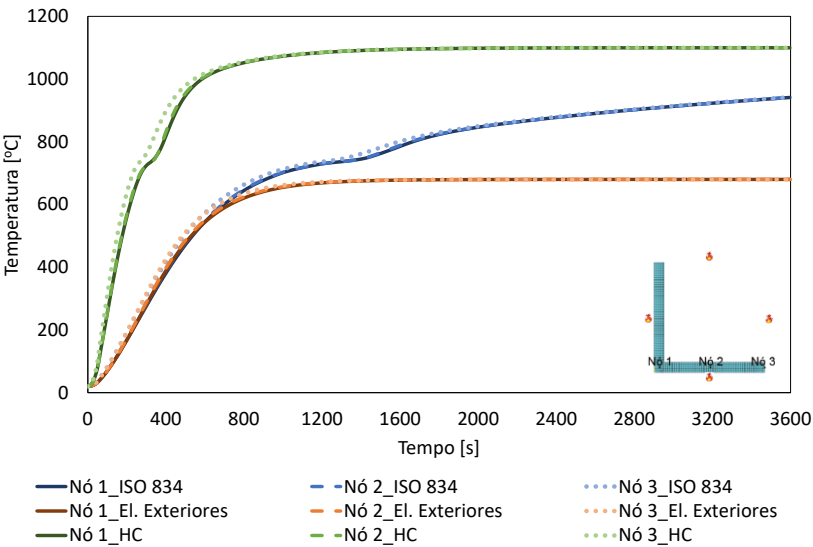
Método Simplificado do Eurocódigo 3



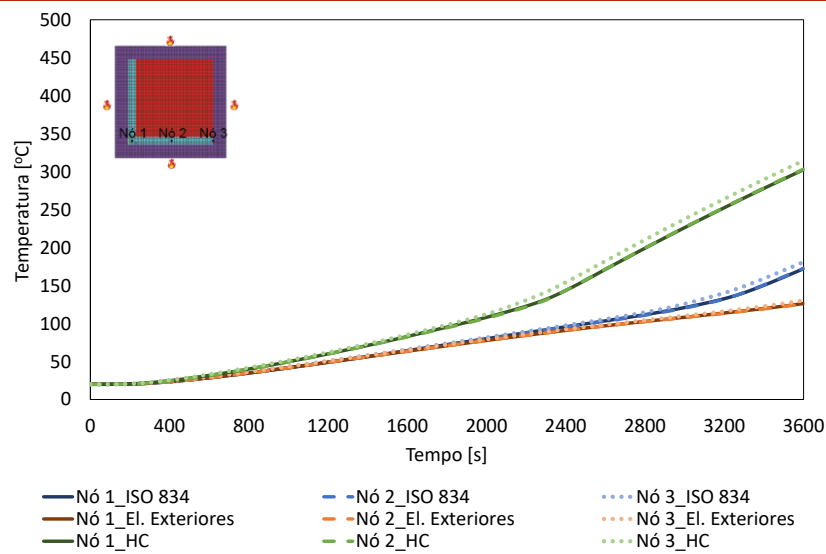
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

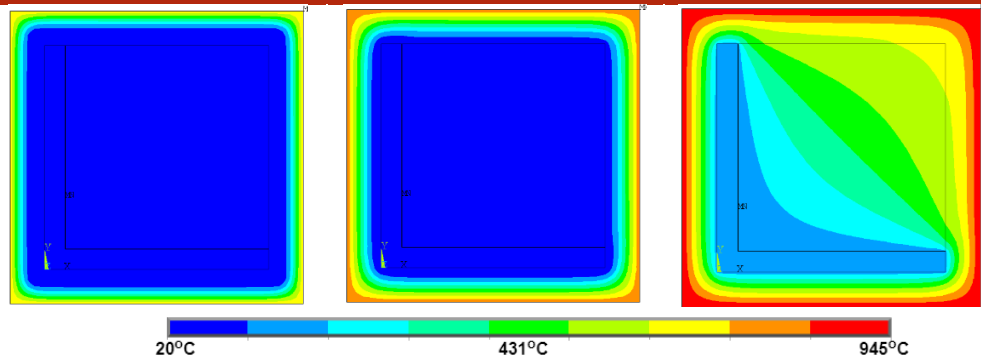


900 segundos

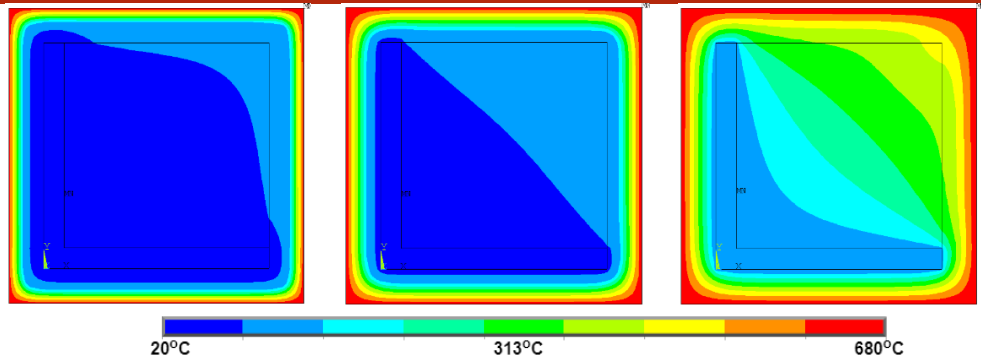
1800 segundos

3600 segundos

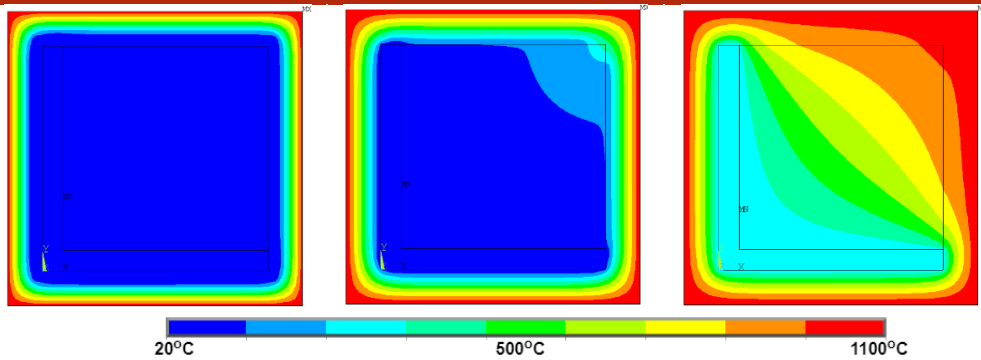
ISO 834



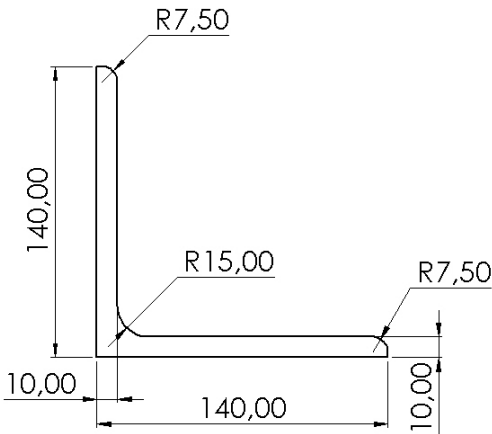
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

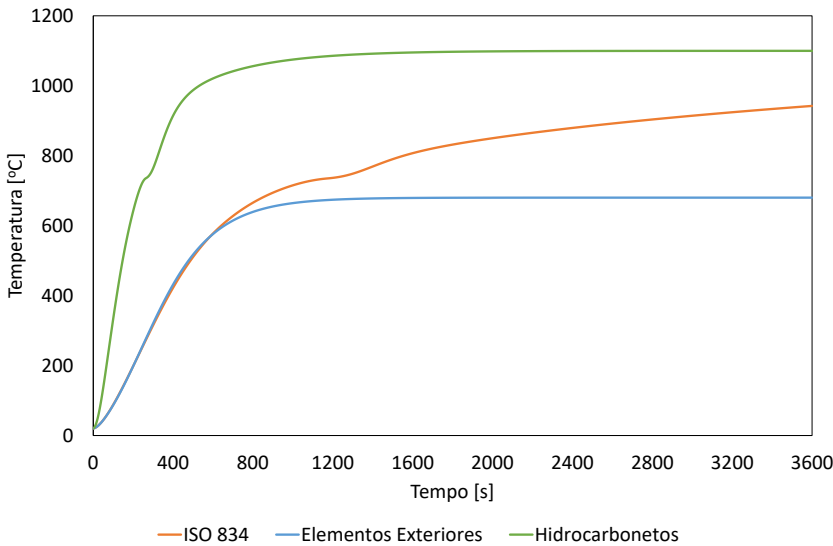


L 140x140x10

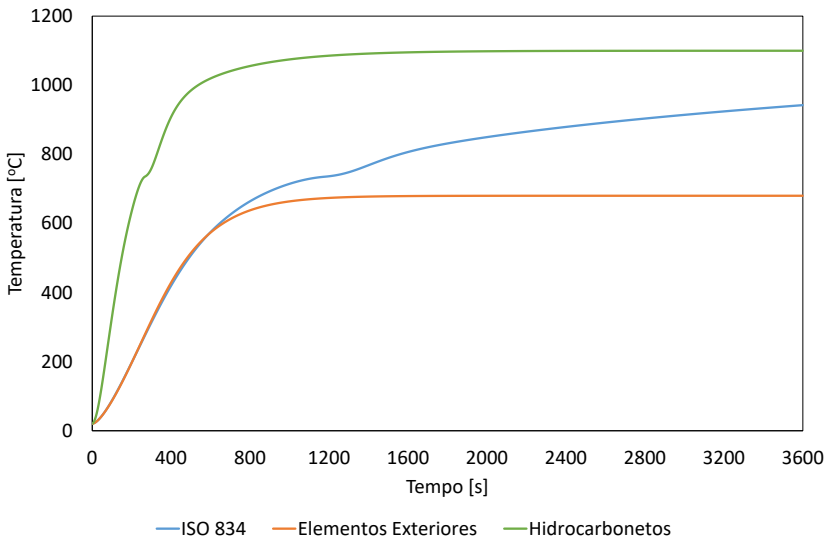


Perímetro [m]	0,55534
Área [m²]	0,002724
Fator de massividade [m ⁻¹]	203,87
Comprimento Característico [m]	0,004905

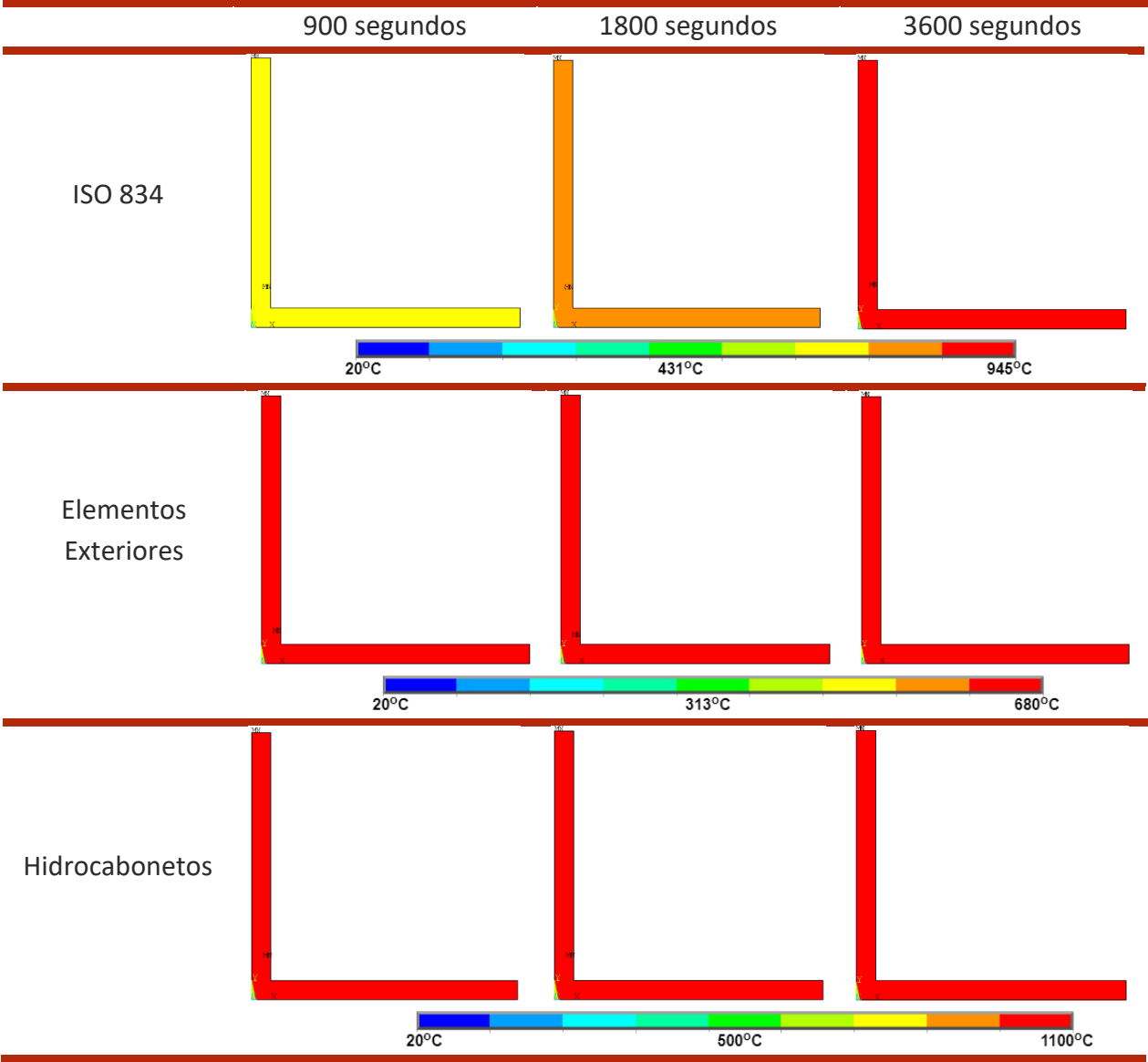
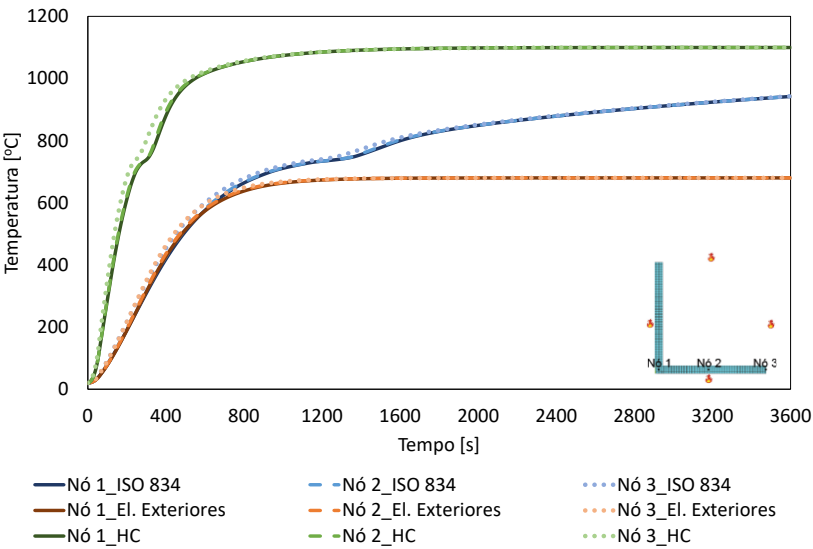
Método Simplificado do Eurocódigo 3



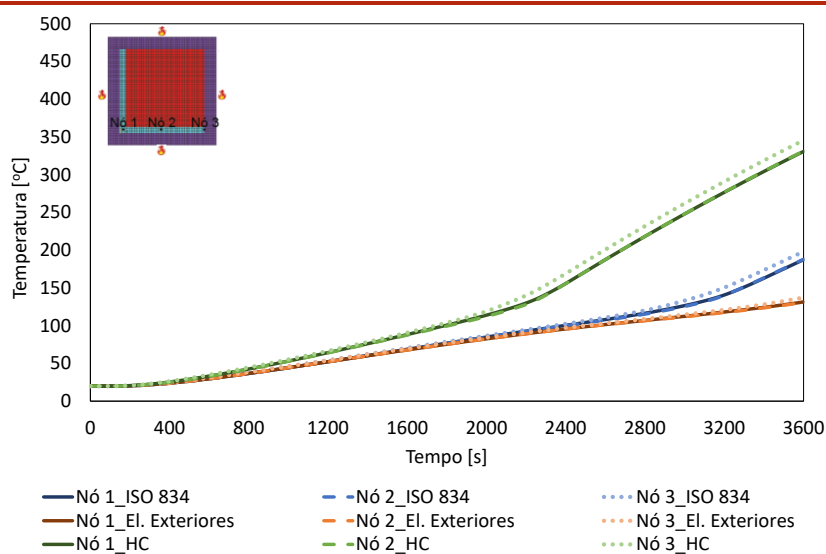
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

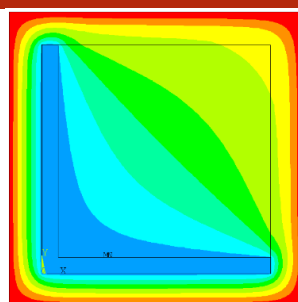
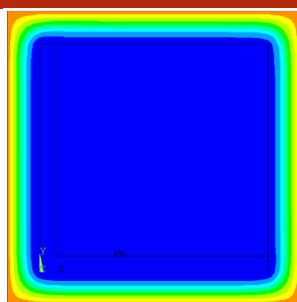
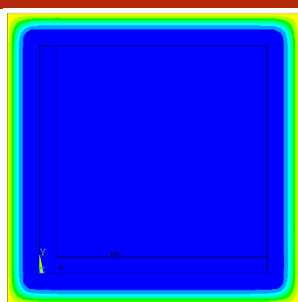


900 segundos

1800 segundos

3600 segundos

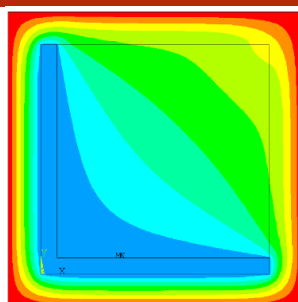
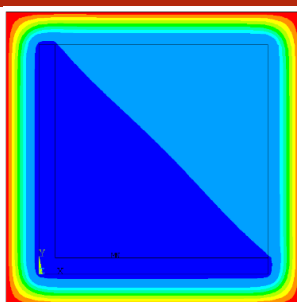
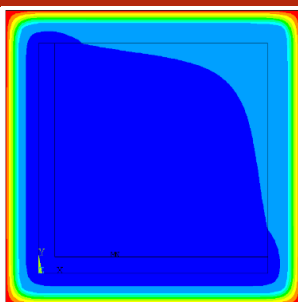
ISO 834



20°C

431°C

945°C

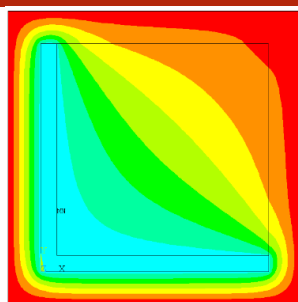
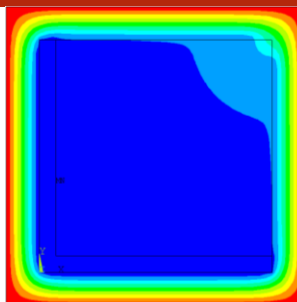
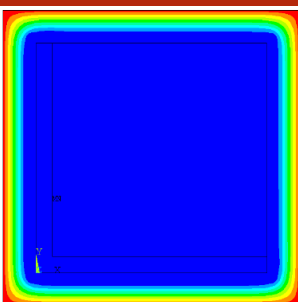
Elementos
Exteriores

20°C

313°C

680°C

Hidrocarbonetos

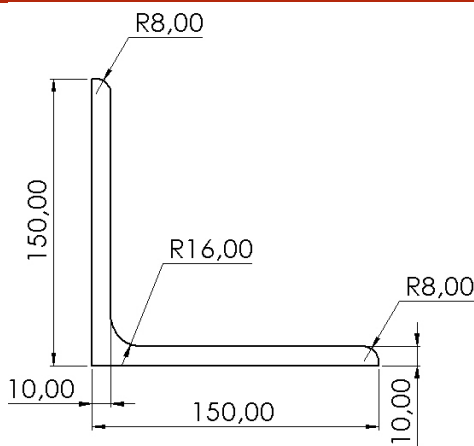


20°C

500°C

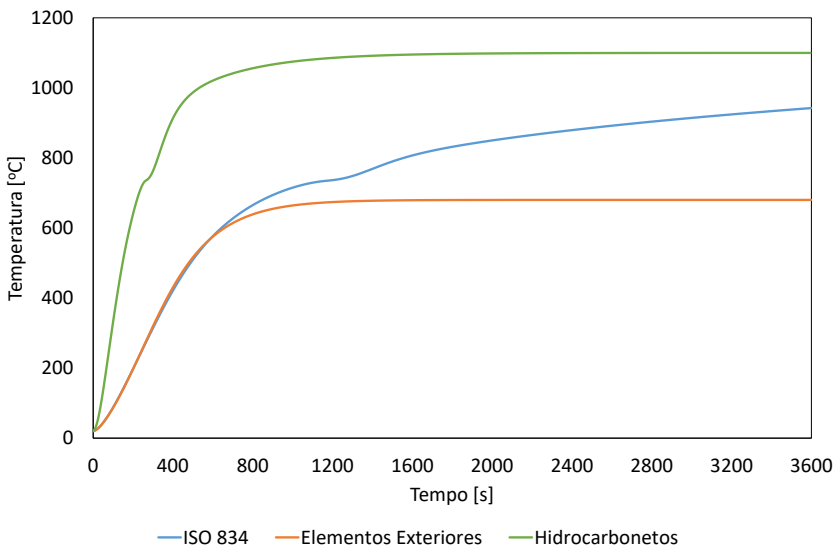
1100°C

L 150x150x10

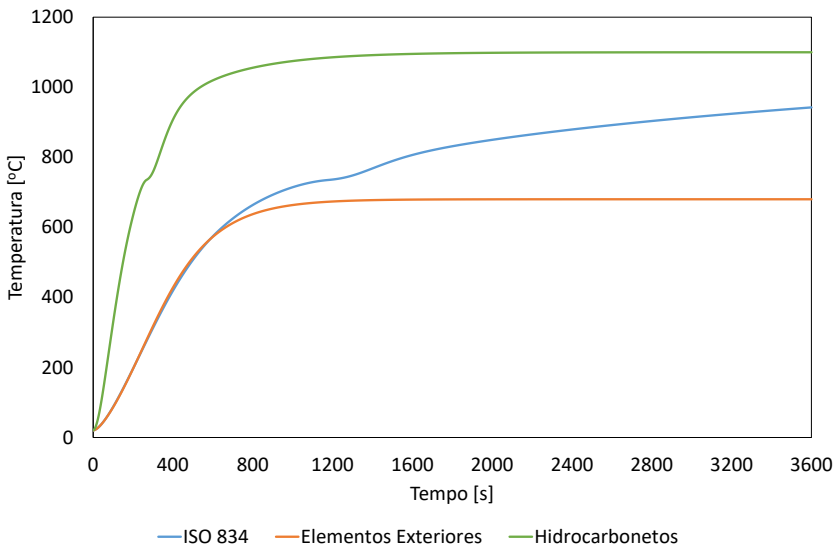


Perímetro [m]	0,5936
Área [m²]	0,002927
Fator de massividade [m ⁻¹]	202,83
Comprimento Característico [m]	0,00493

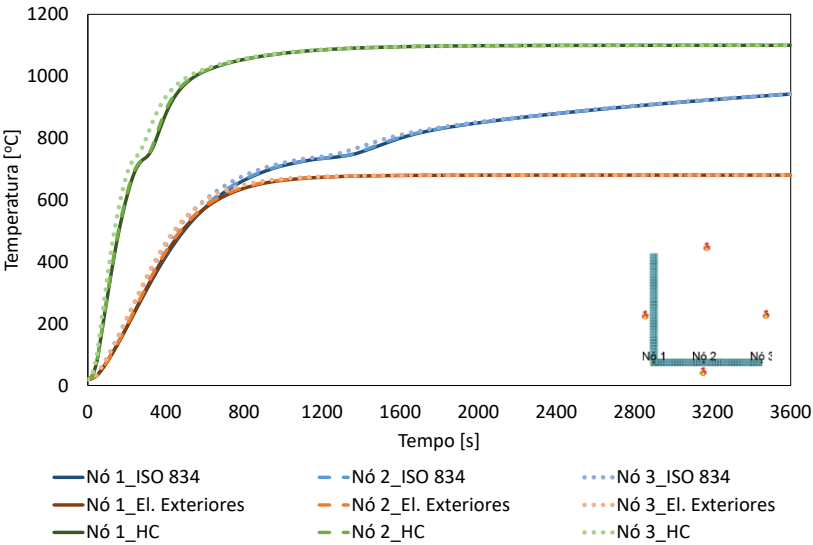
Método Simplificado do Eurocódigo 3



Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)

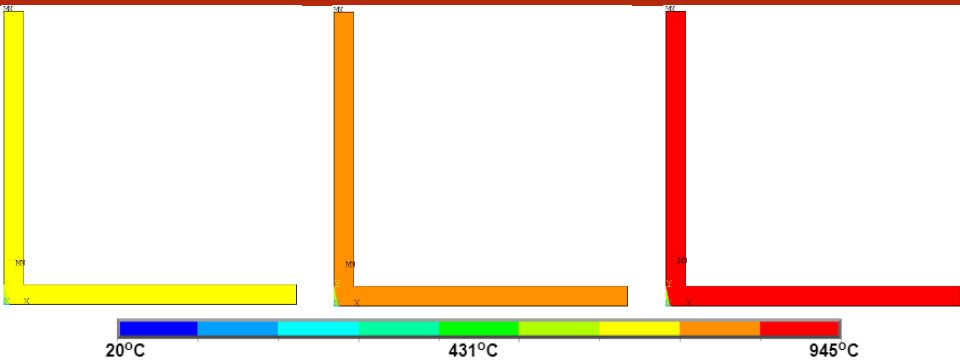


900 segundos

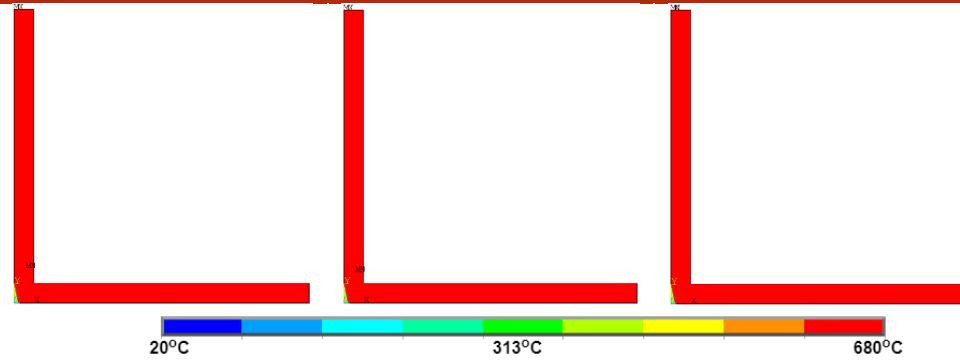
1800 segundos

3600 segundos

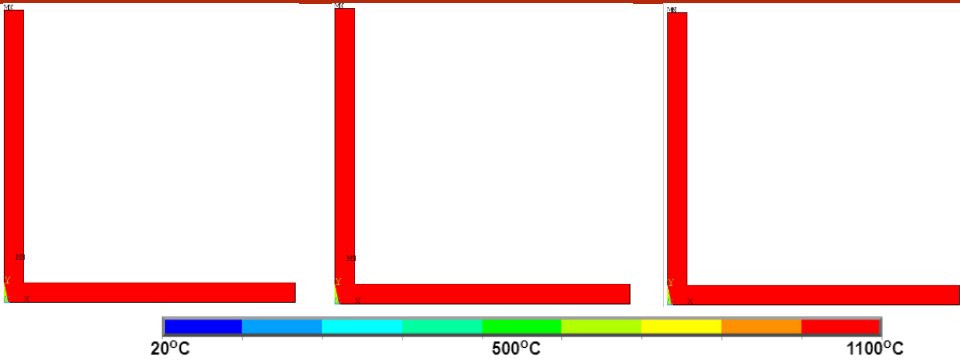
ISO 834



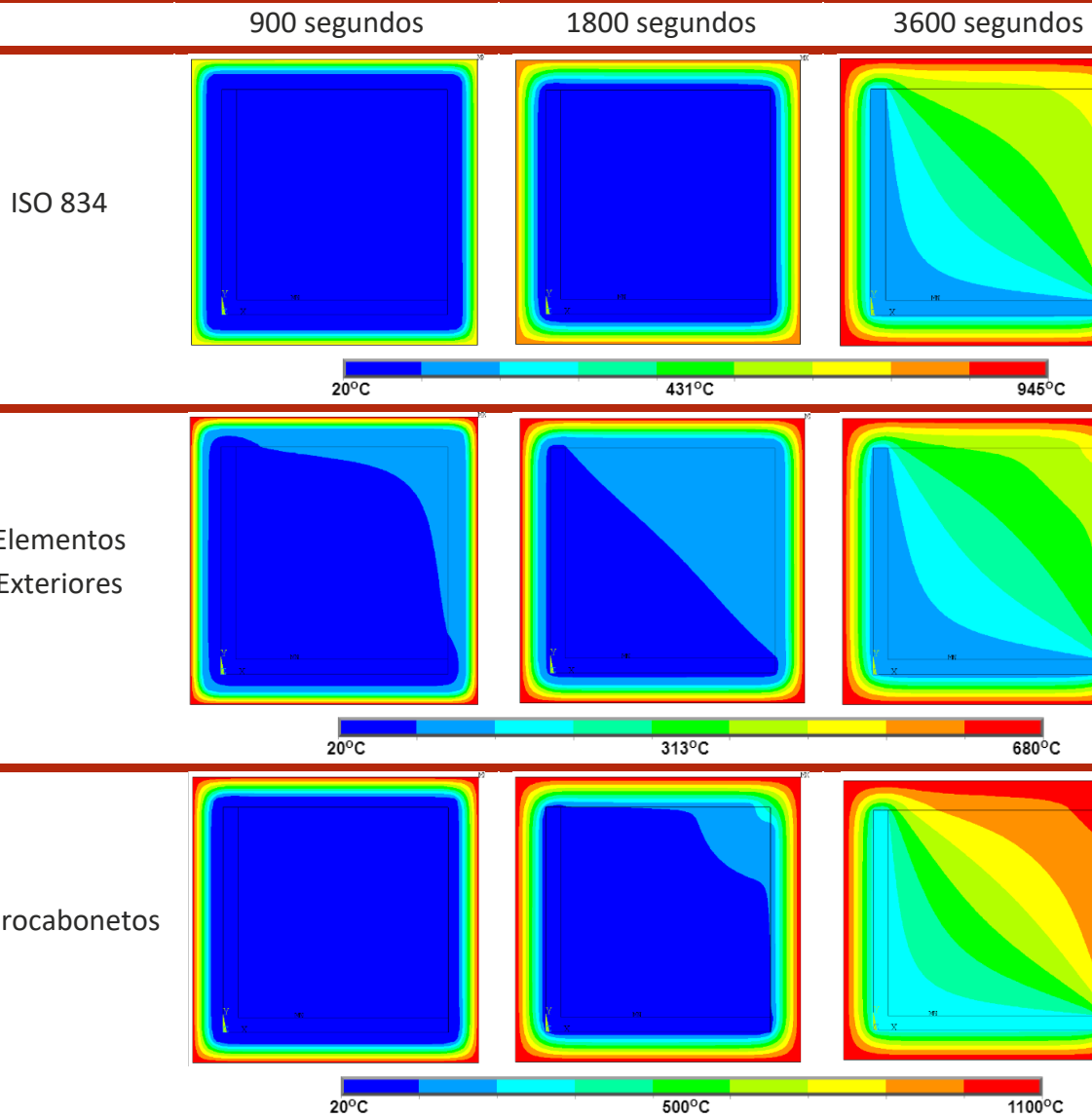
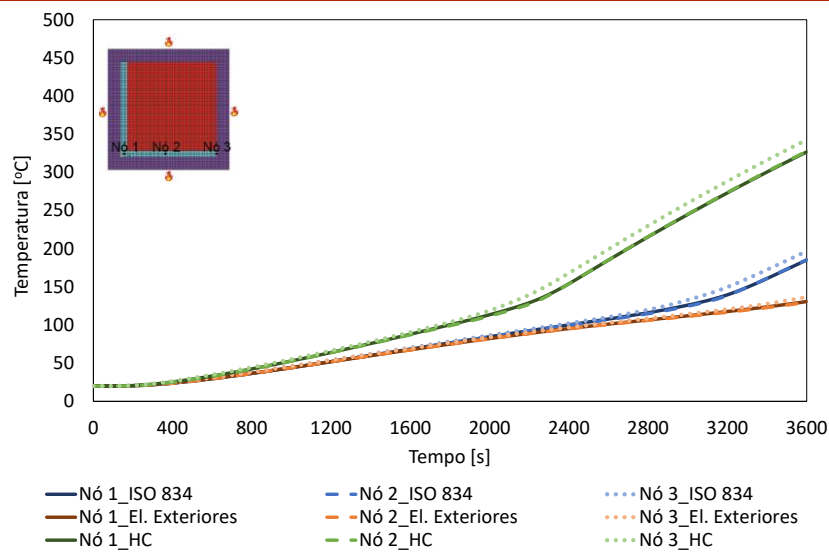
Elementos Exteriores



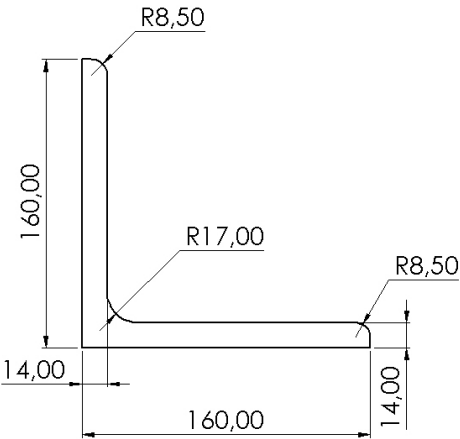
Hidrocarbonetos



Método Numérico (Perfil Protegido)

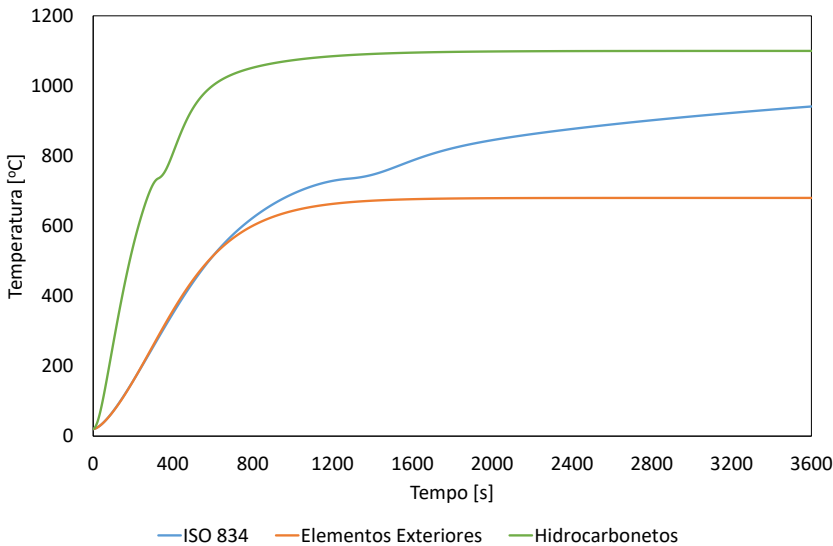


L 160x160x14

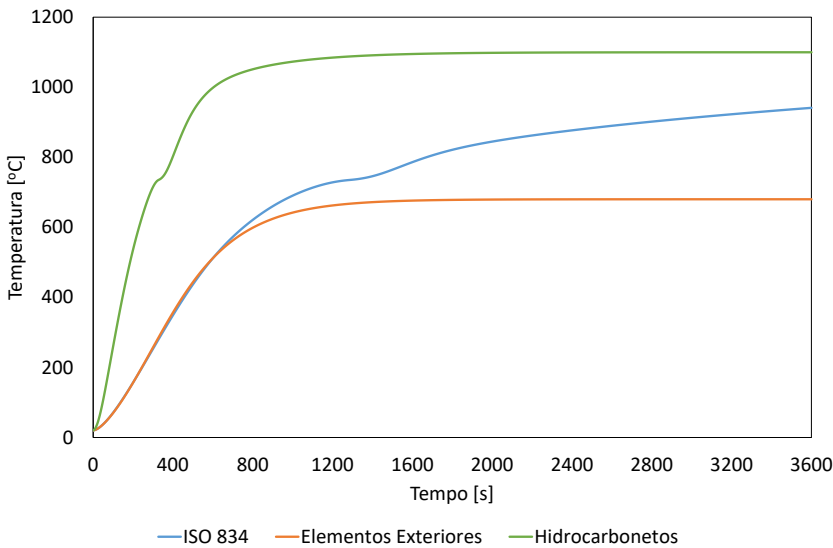


Perímetro [m]	0,64005
Área [m ²]	0,004315
Fator de massividade [m ⁻¹]	148,33
Comprimento Característico [m]	0,0067

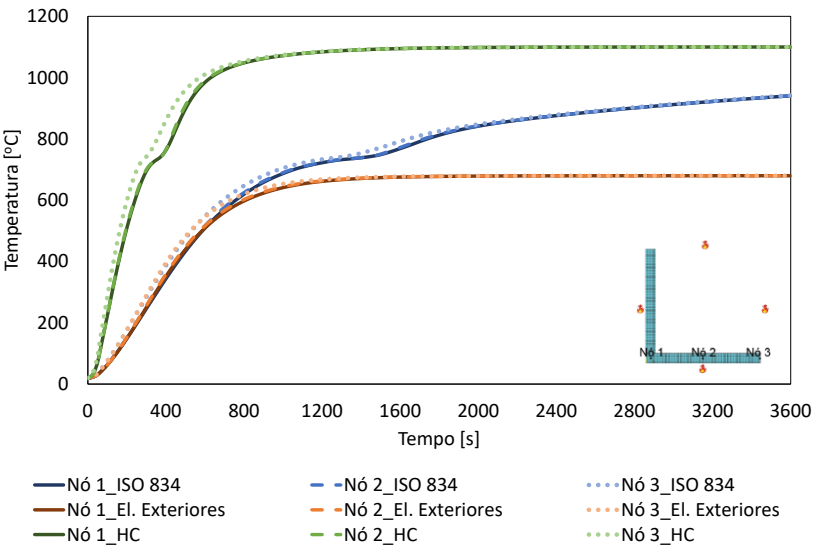
Método Simplificado do Eurocódigo 3



Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)

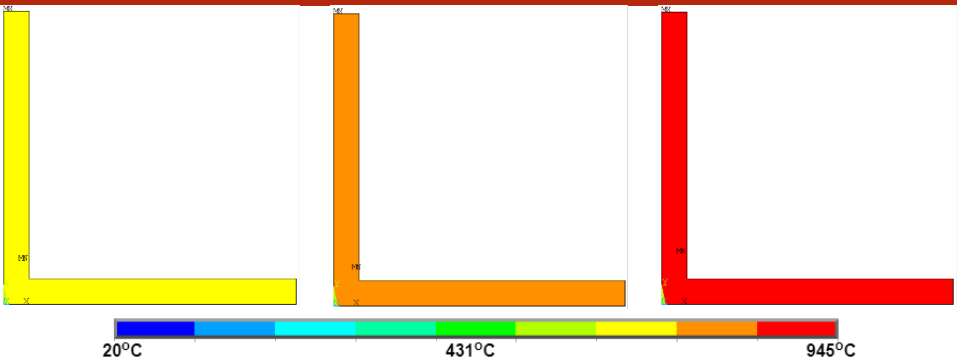


900 segundos

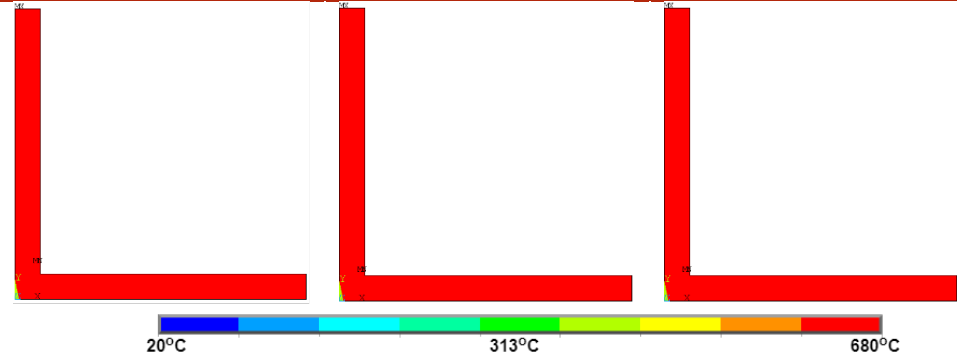
1800 segundos

3600 segundos

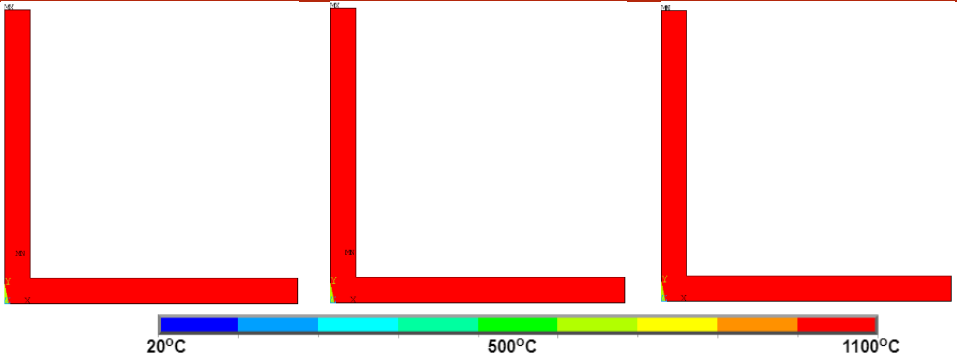
ISO 834



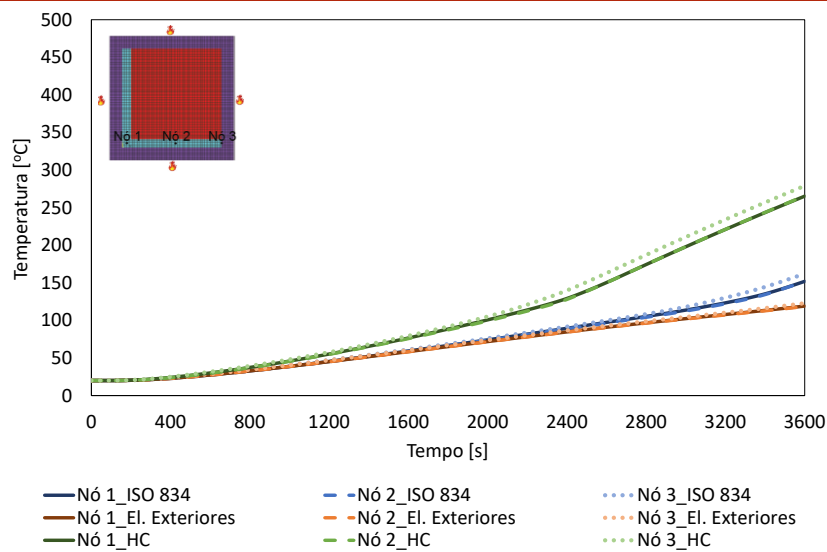
Elementos
Exteriores



Hidrocarbonetos



Método Numérico (Perfil Protegido)

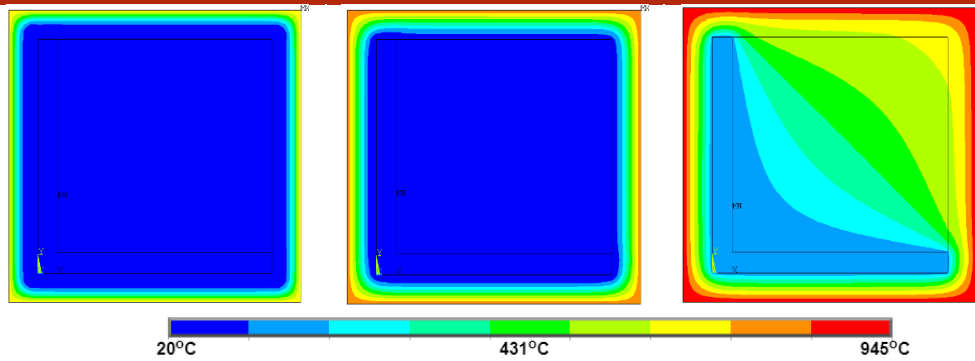


900 segundos

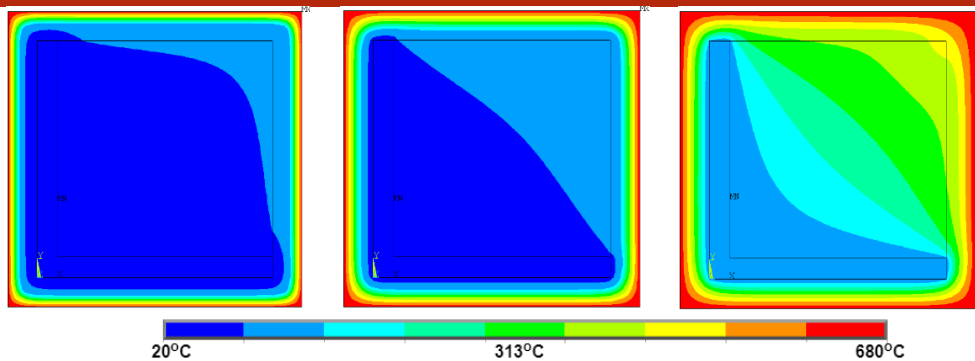
1800 segundos

3600 segundos

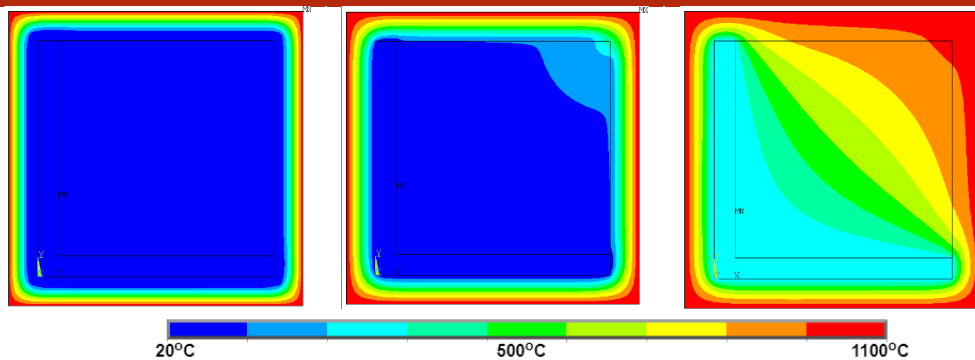
ISO 834



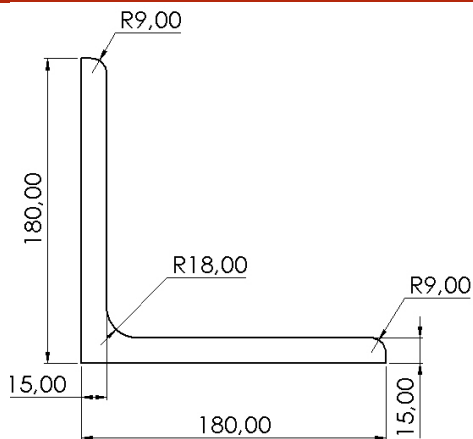
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

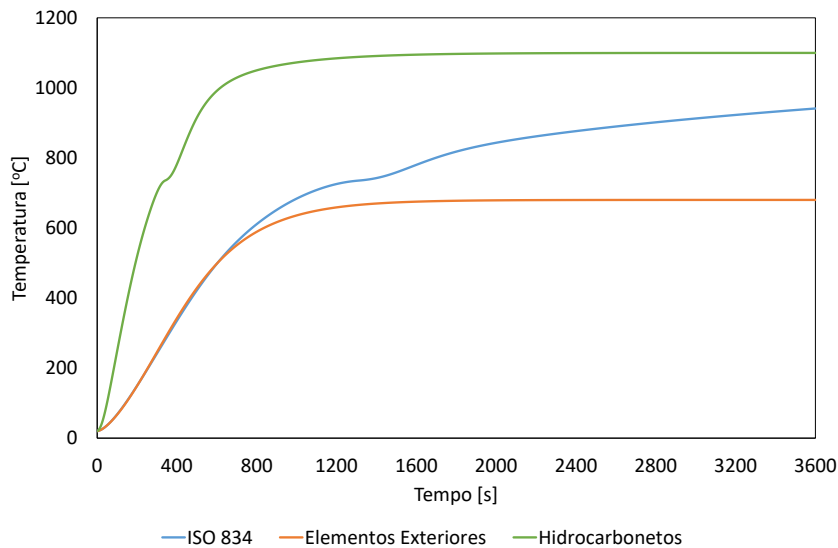


L 180x180x15

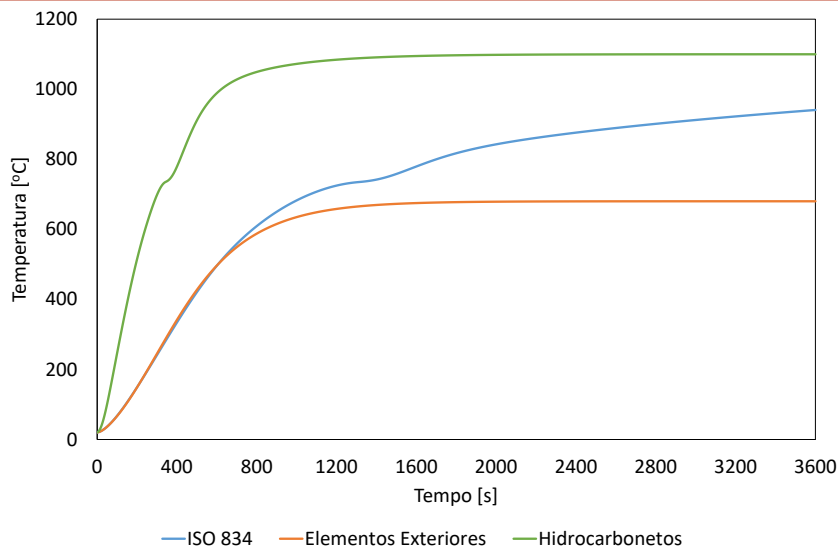


Perímetro [m]	0,72205
Área [m²]	0,00521
Fator de massividade [m ⁻¹]	138,59
Comprimento Característico [m]	0,0072

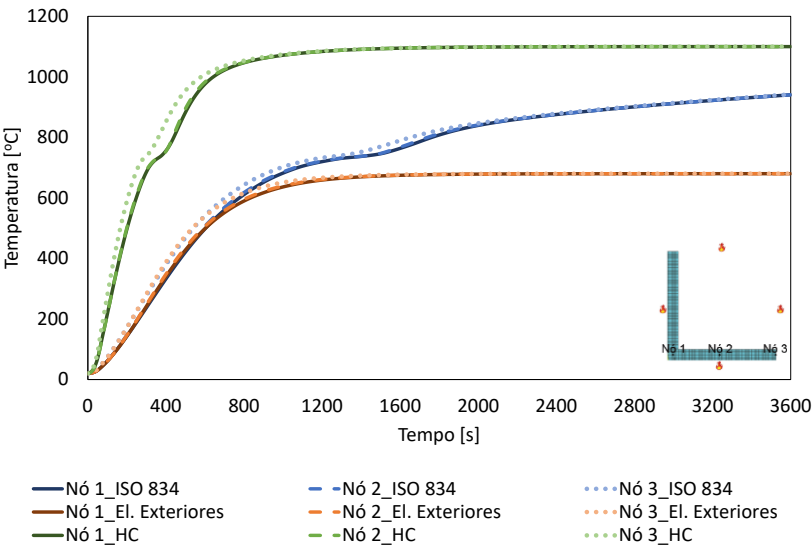
Método Simplificado do Eurocódigo 3



Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)

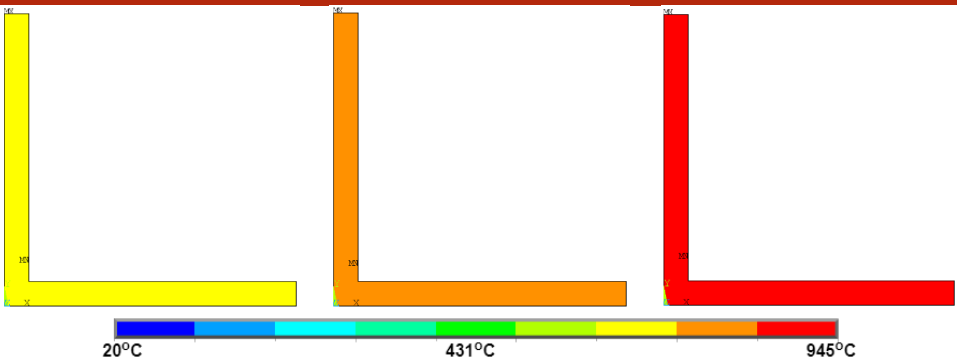


900 segundos

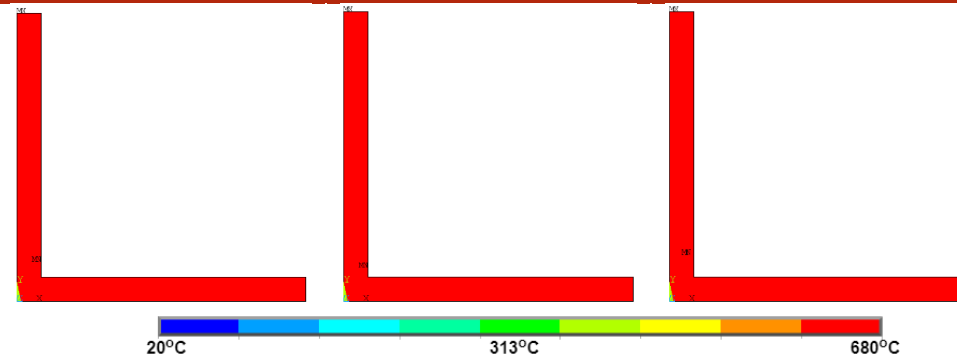
1800 segundos

3600 segundos

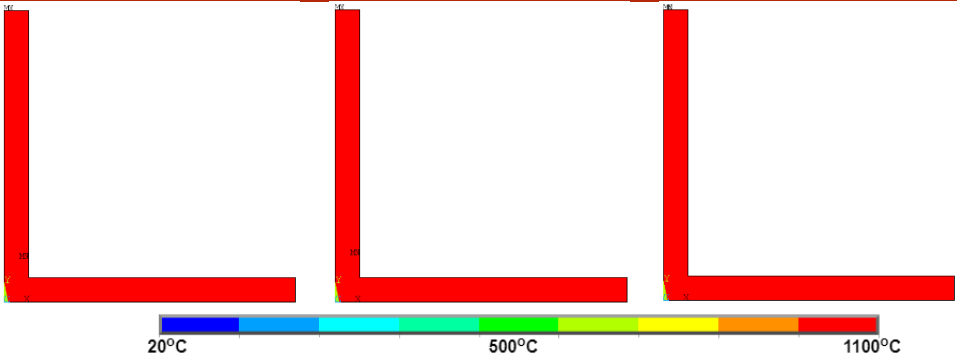
ISO 834



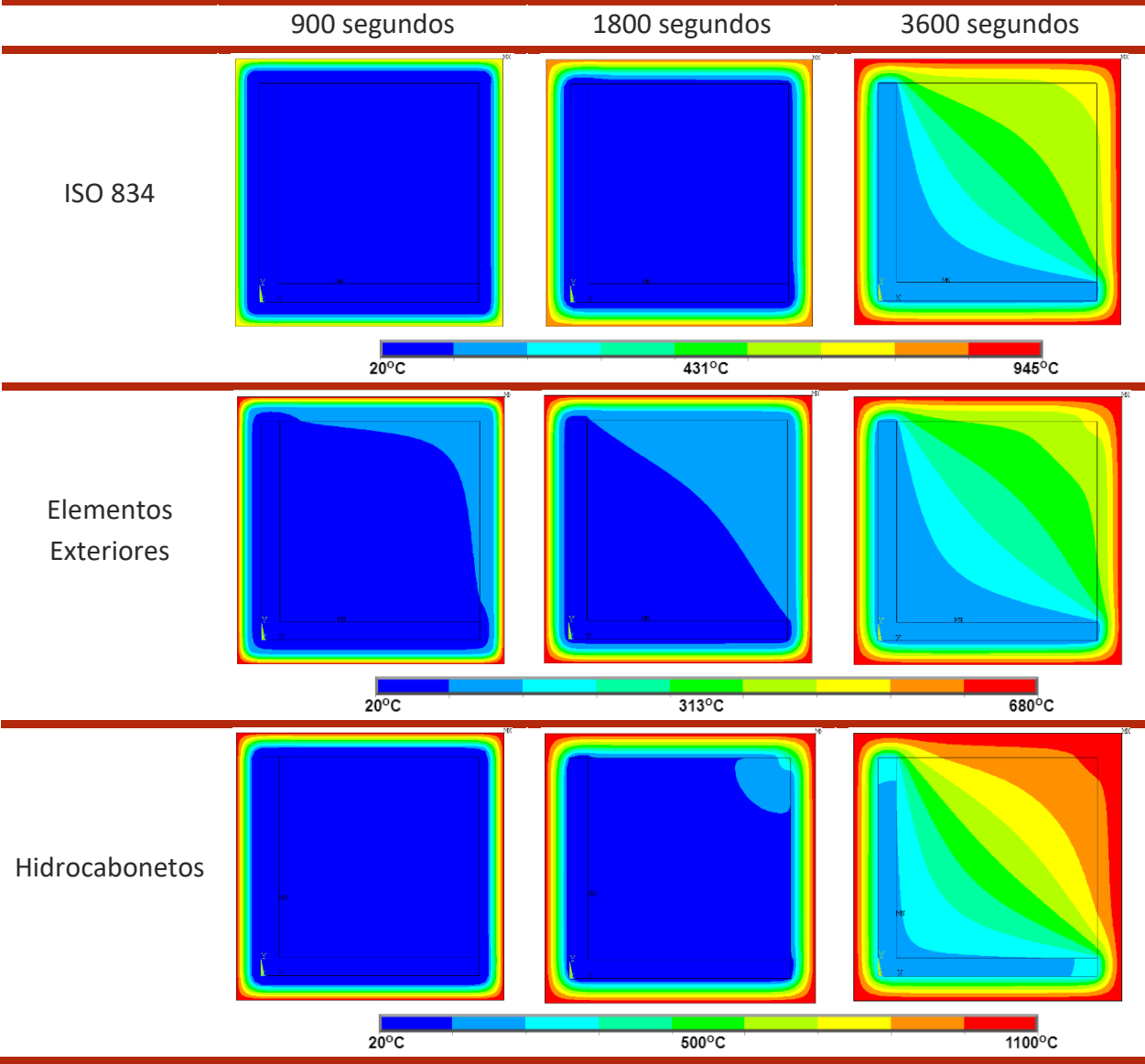
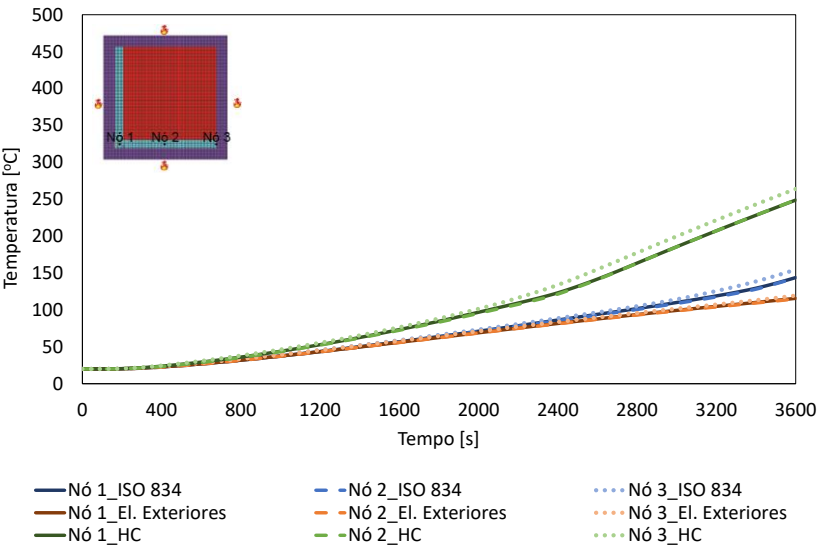
Elementos Exteriores



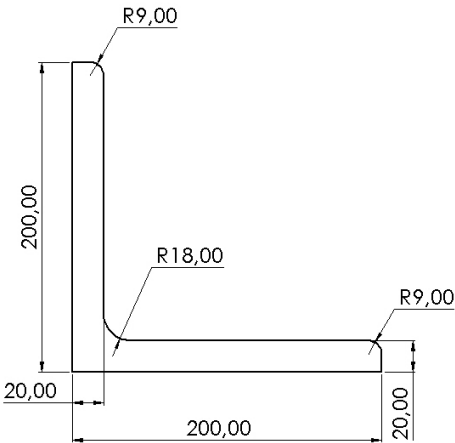
Hidrocarbonetos



Método Numérico (Perfil Protegido)

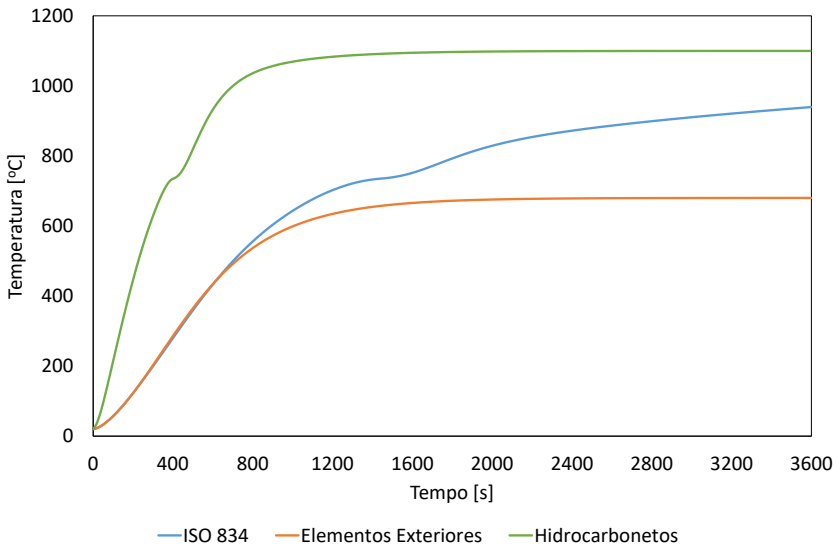


L 200x200x20

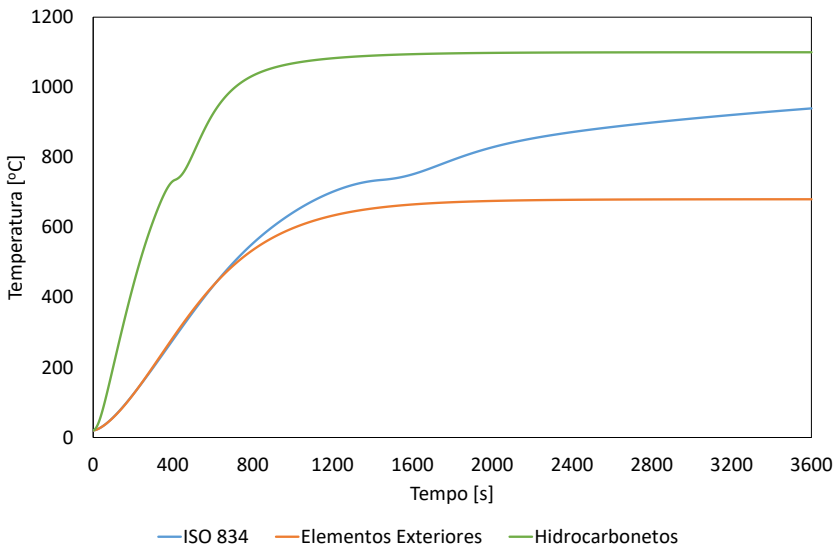


Perímetro [m]	0,8104
Área [m ²]	0,007635
Fator de massividade [m ⁻¹]	106,144
Comprimento Característico [m]	0,0094

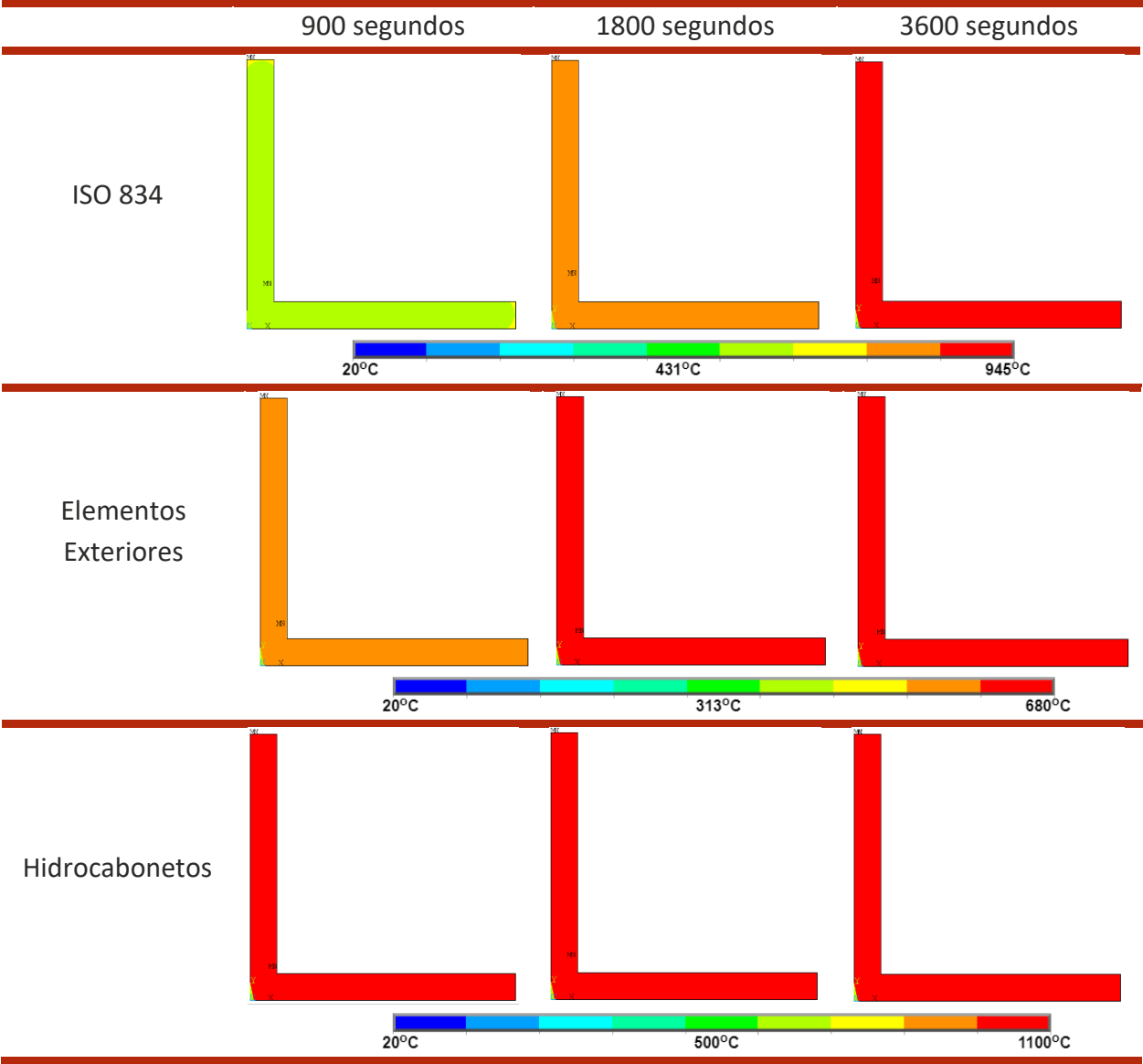
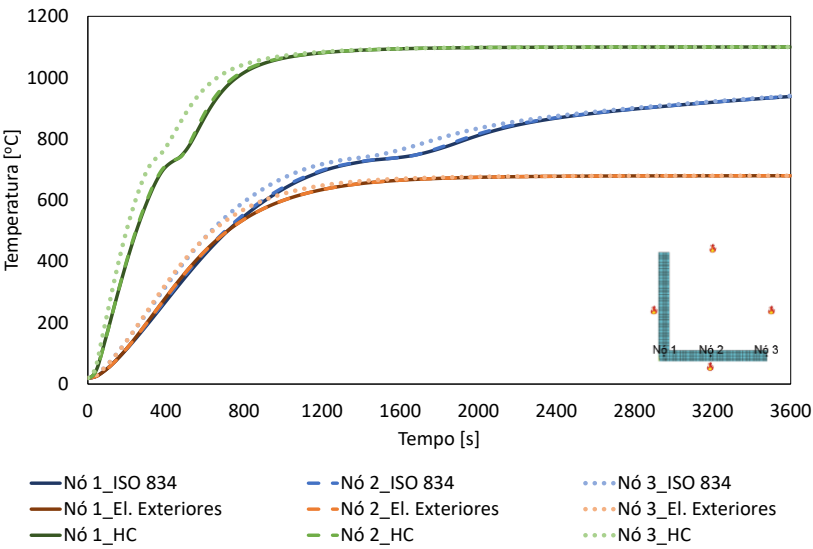
Método Simplificado do Eurocódigo 3



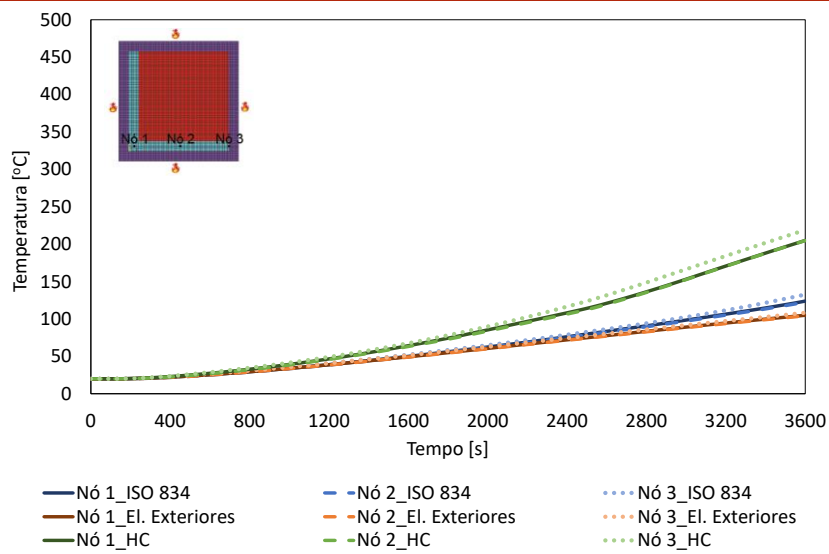
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

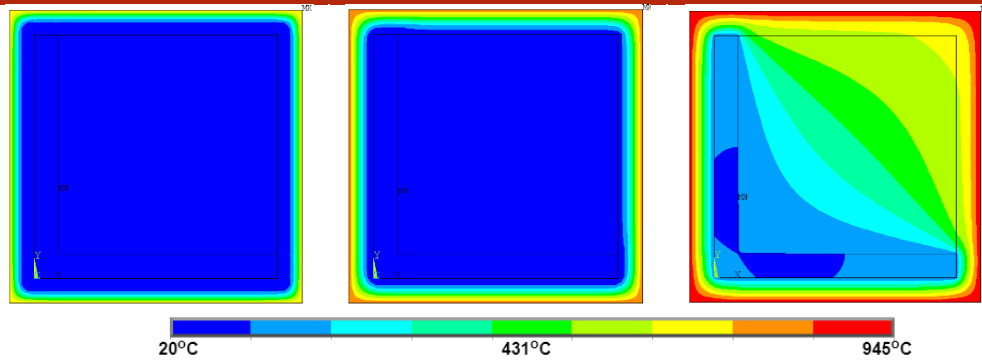


900 segundos

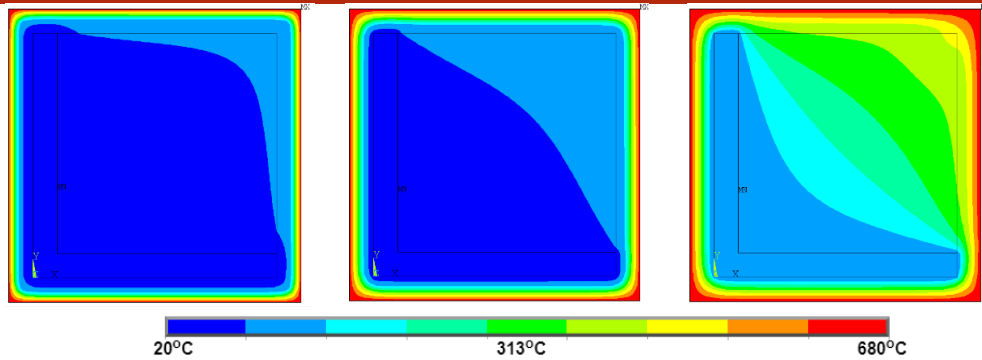
1800 segundos

3600 segundos

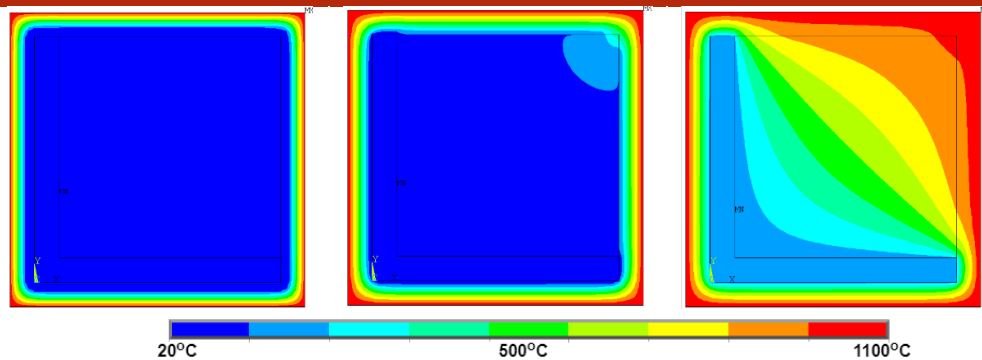
ISO 834



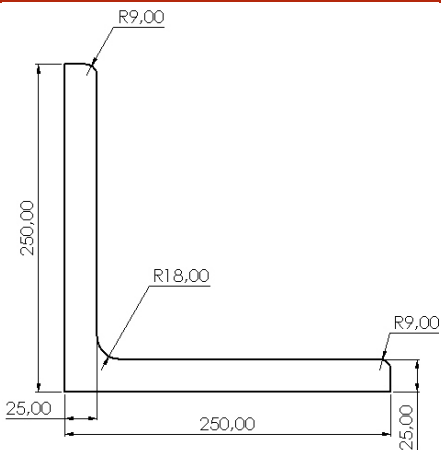
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

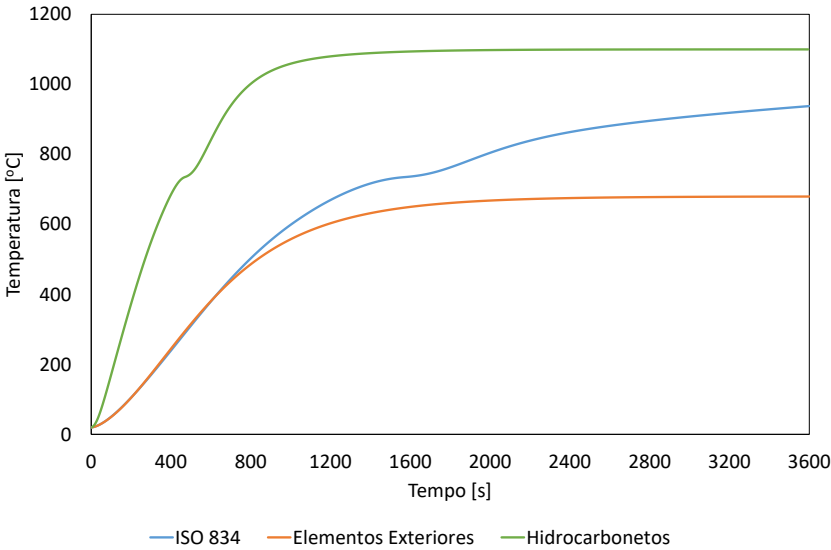


L 250x250x25

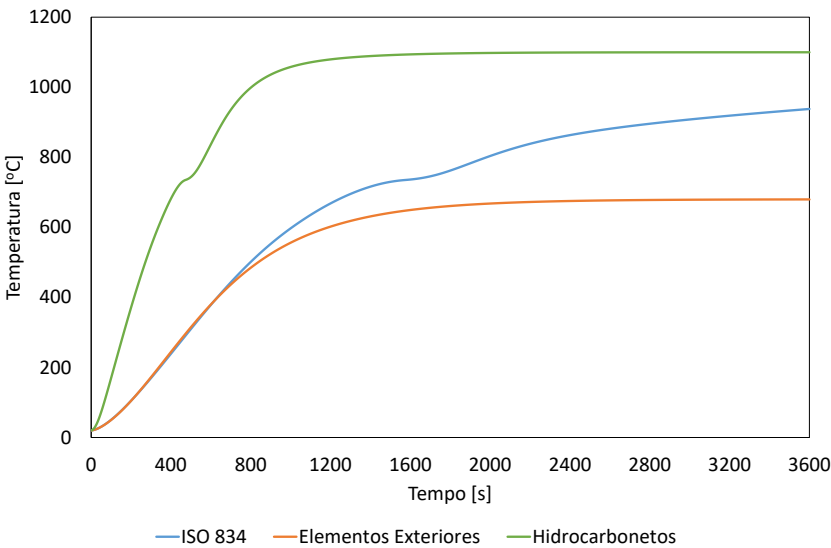


Perímetro [m]	1,0204
Área [m²]	0,01191
Fator de massividade [m ⁻¹]	85,67
Comprimento Característico [m]	0,012

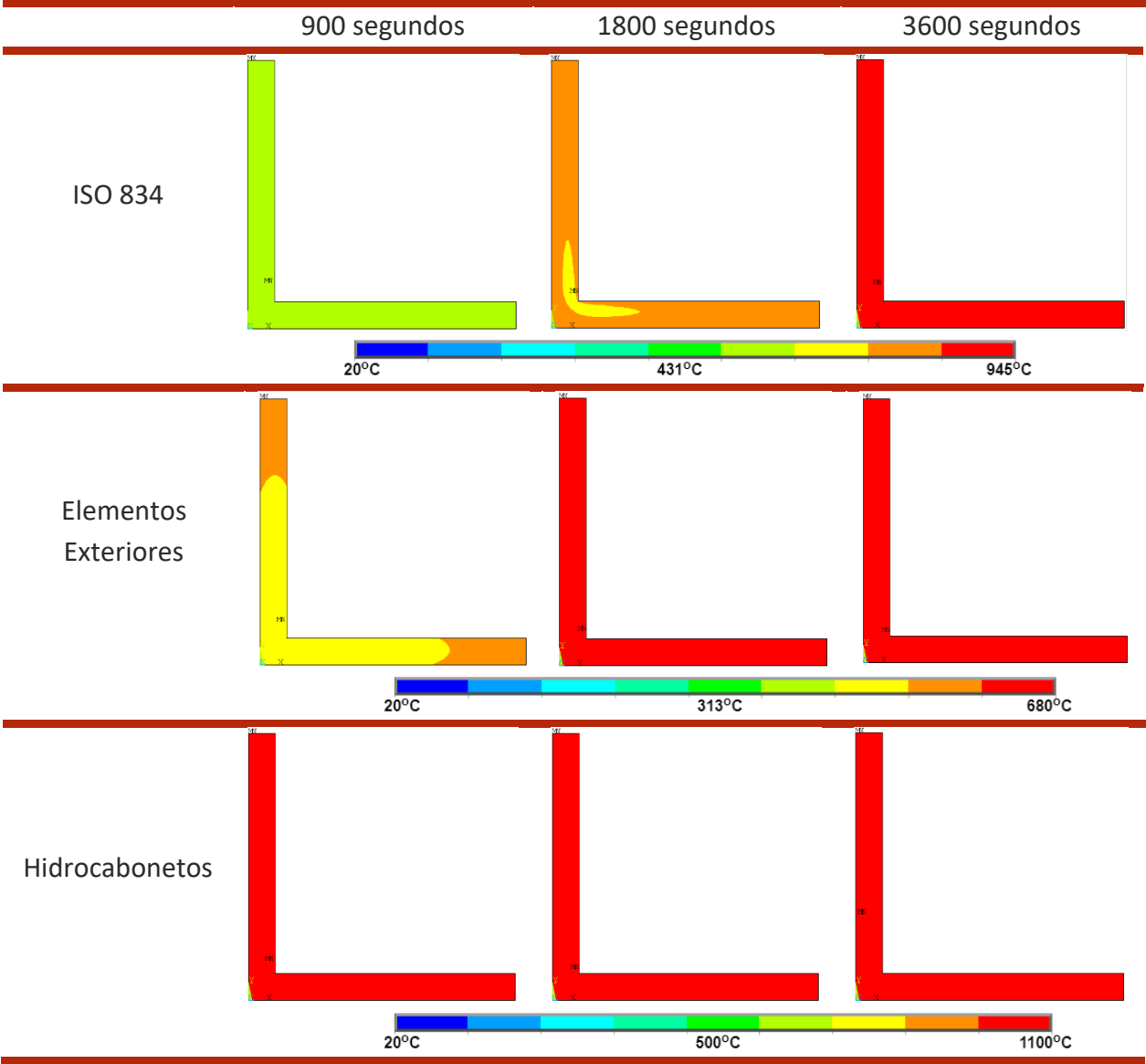
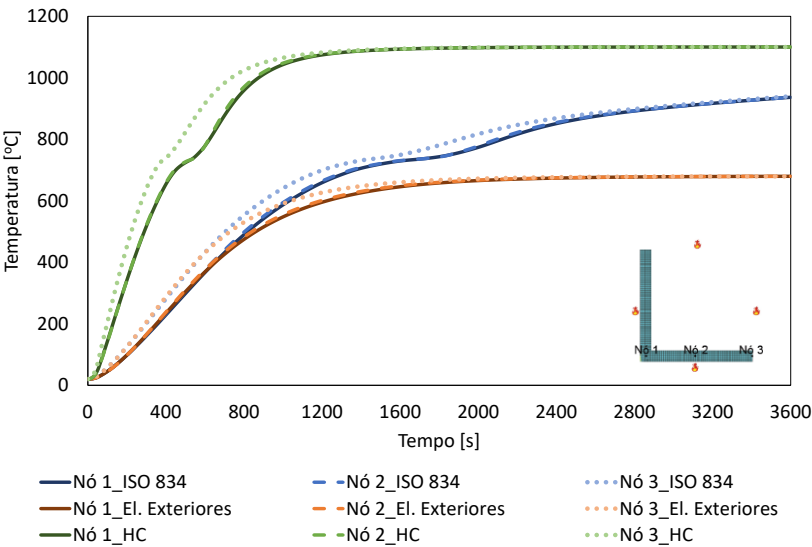
Método Simplificado do Eurocódigo 3



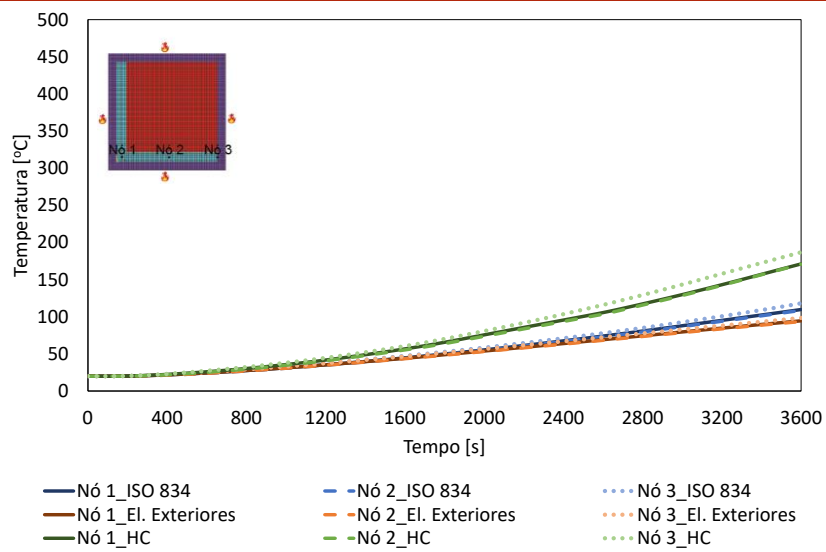
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

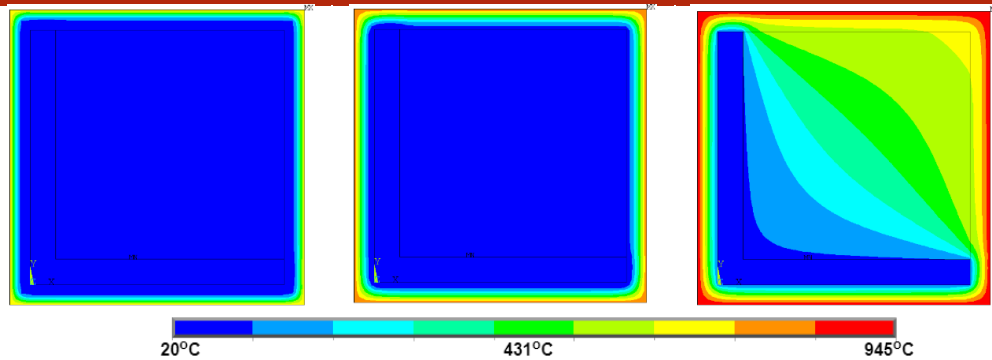
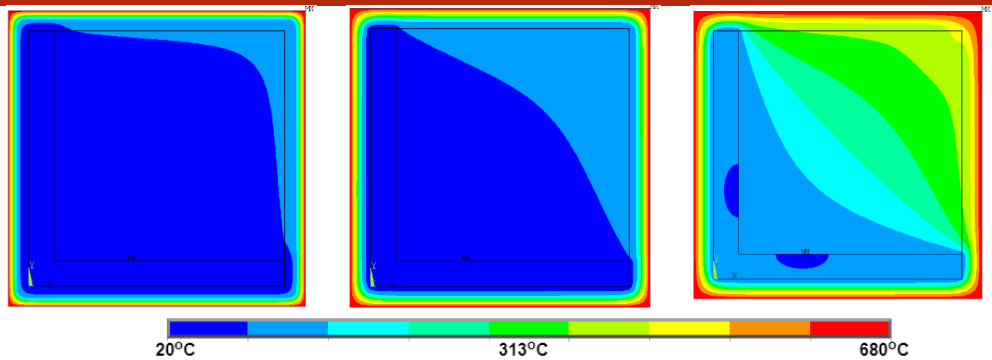


900 segundos

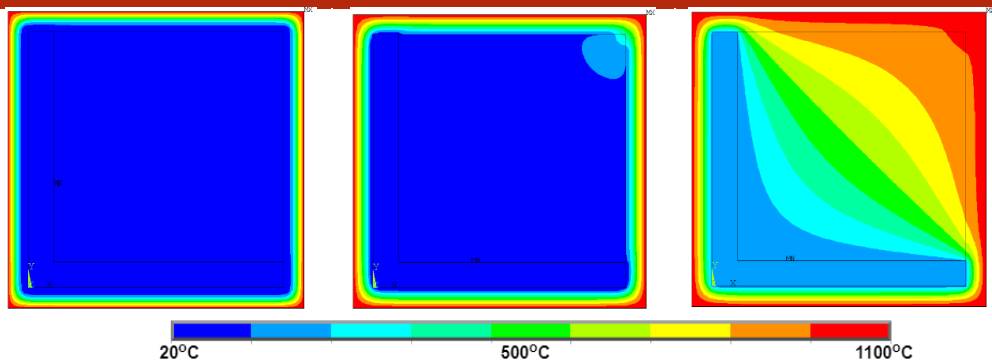
1800 segundos

3600 segundos

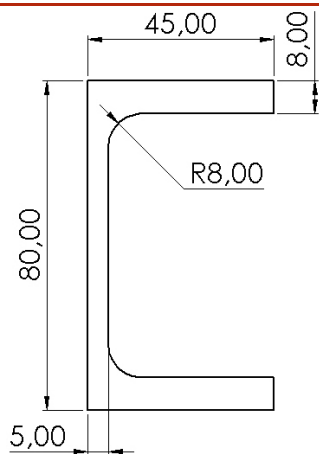
ISO 834

Elementos
Exteriores

Hidrocarbonetos

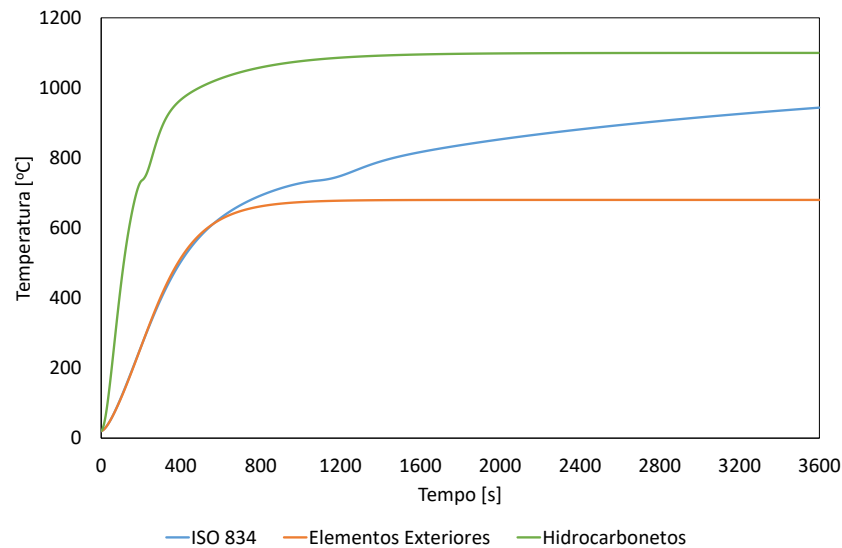


UAP 80

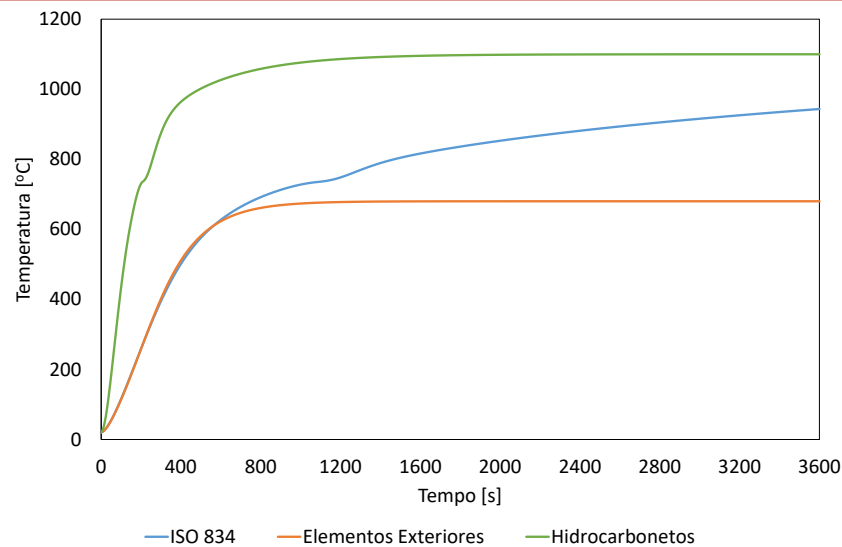


Perímetro [m]	0,3231
Área [m²]	0,001067
Fator de massividade [m ⁻¹]	302,84
Comprimento Característico [m]	0,0033

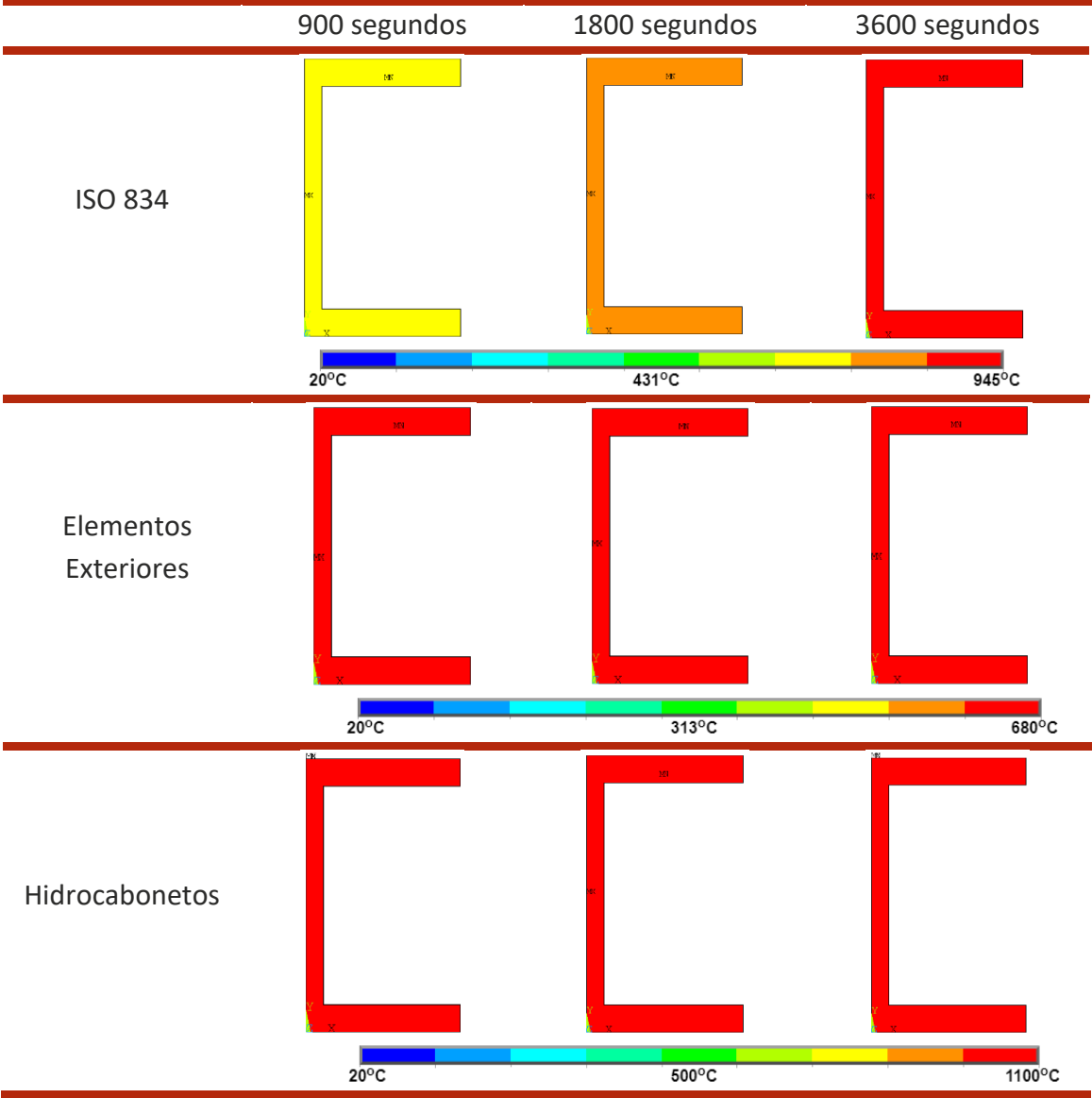
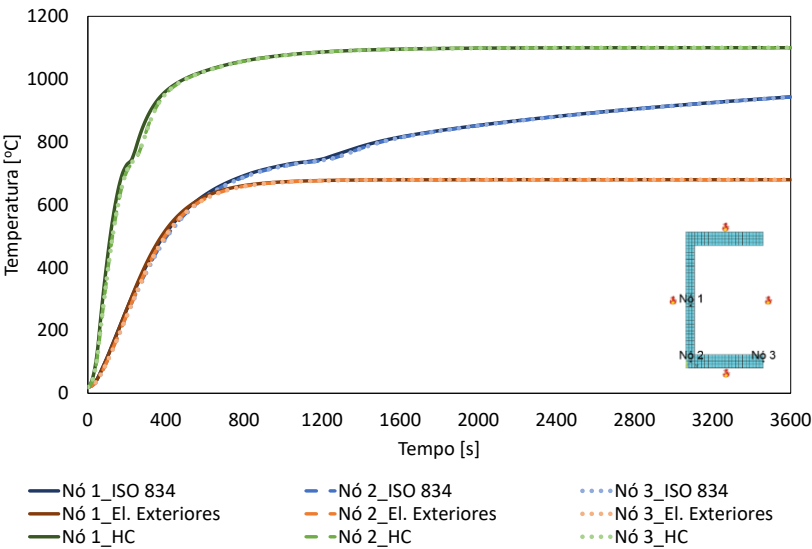
Método Simplificado do Eurocódigo 3



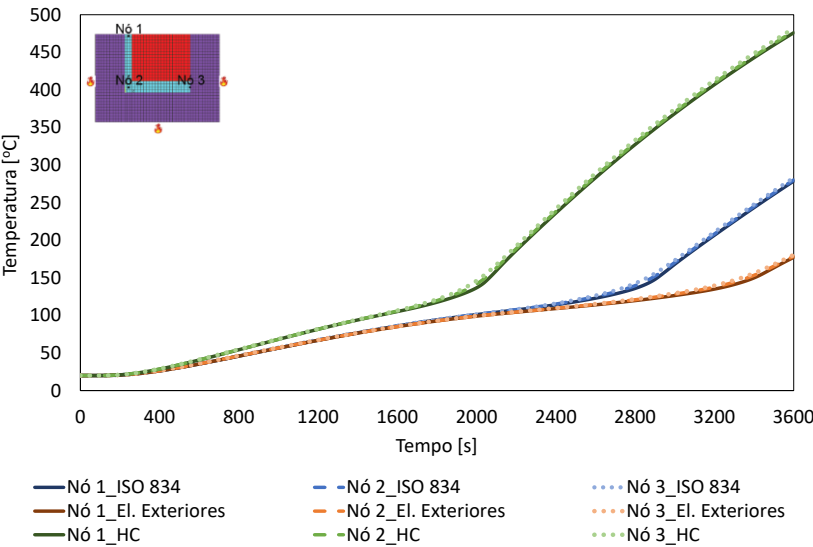
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

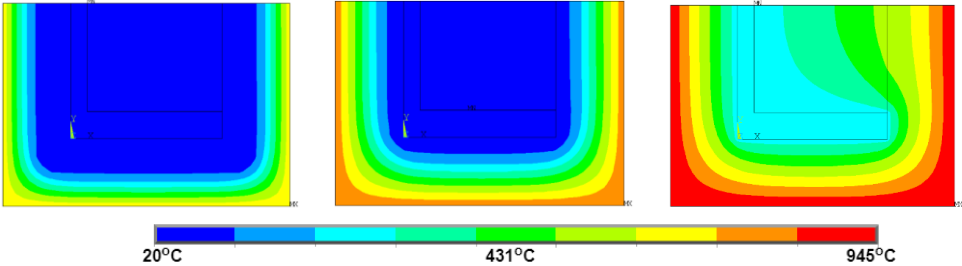


900 segundos

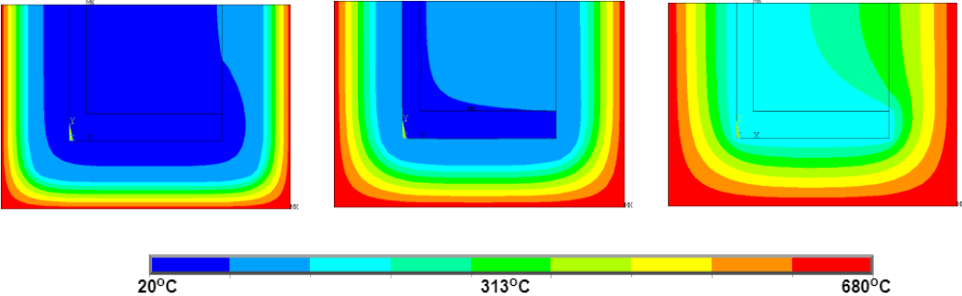
1800 segundos

3600 segundos

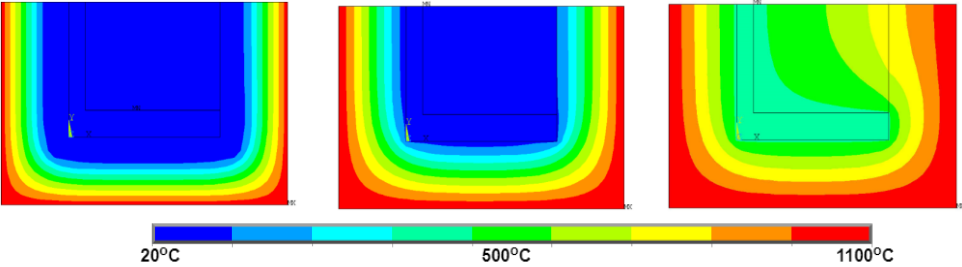
ISO 834



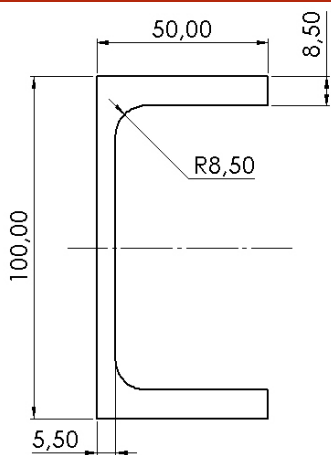
Elementos Exteriores



Hidrocabonetos

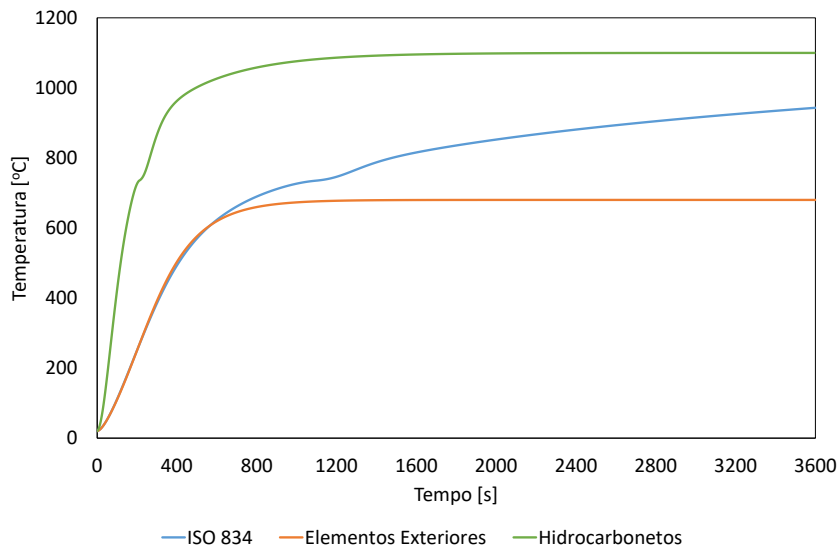


UAP 100

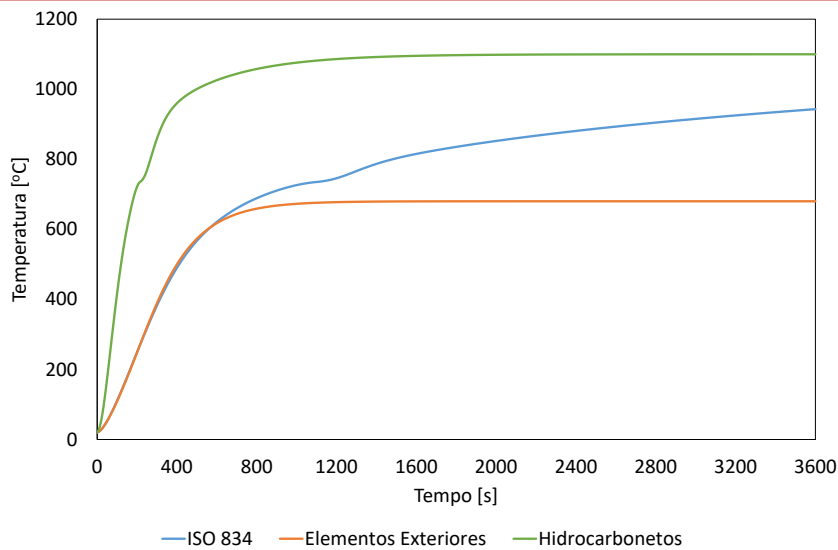


Perímetro [m]	0,3817
Área [m ²]	0,001338
Fator de massividade [m ⁻¹]	285,28
Comprimento Característico [m]	0,0035

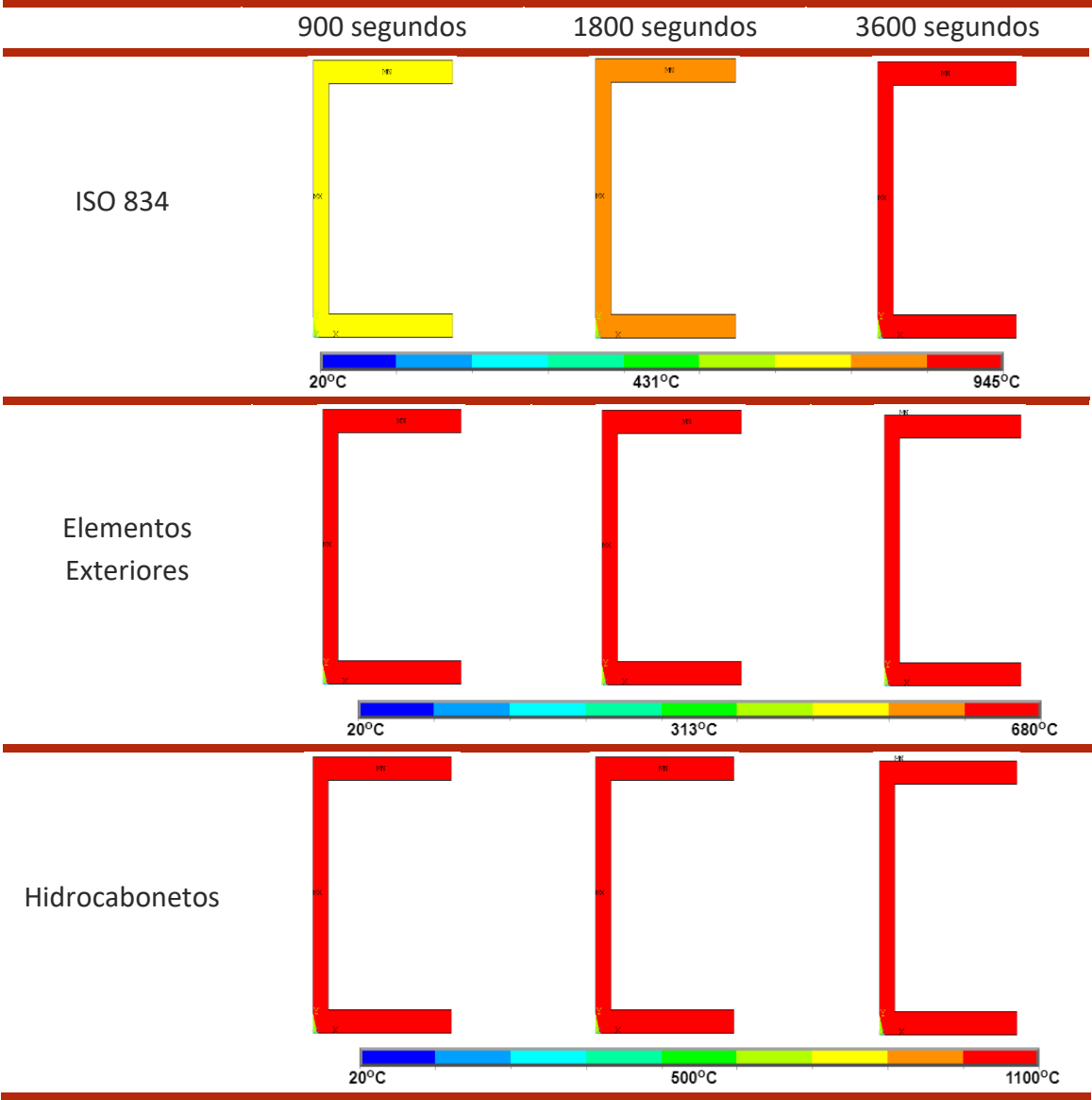
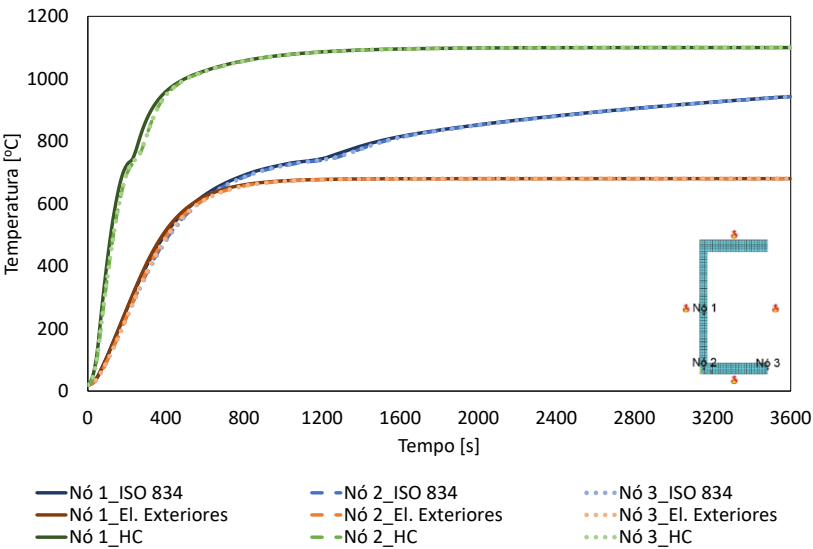
Método Simplificado do Eurocódigo 3



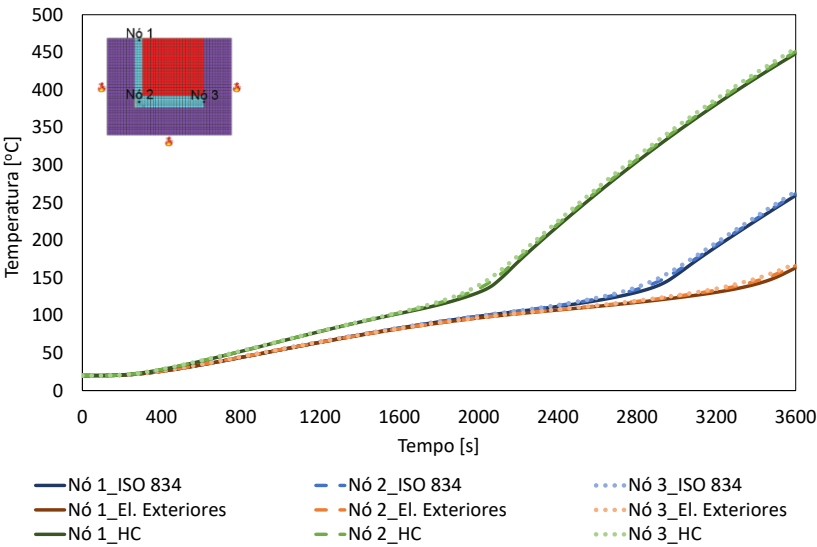
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

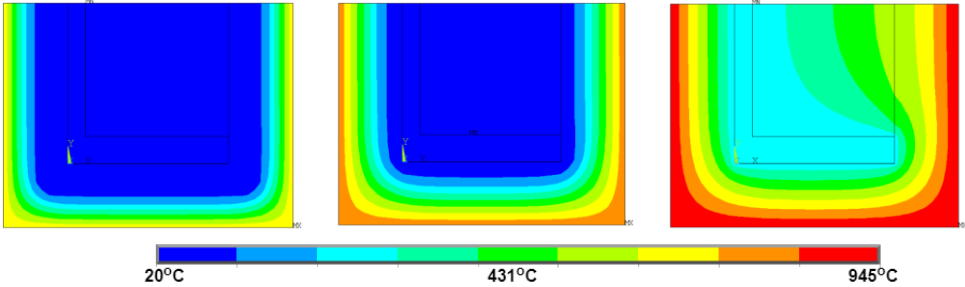


900 segundos

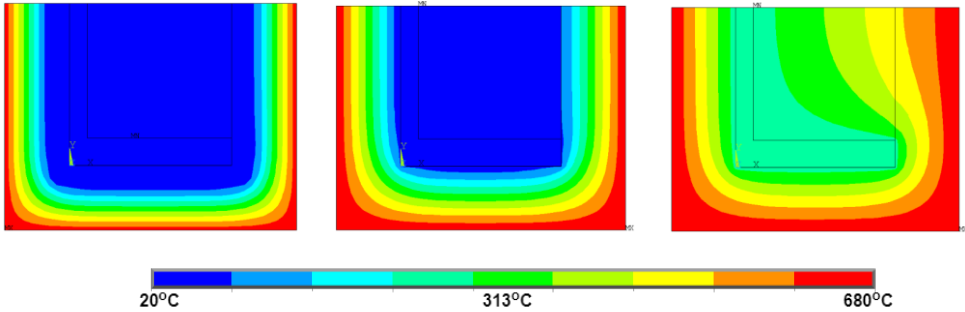
1800 segundos

3600 segundos

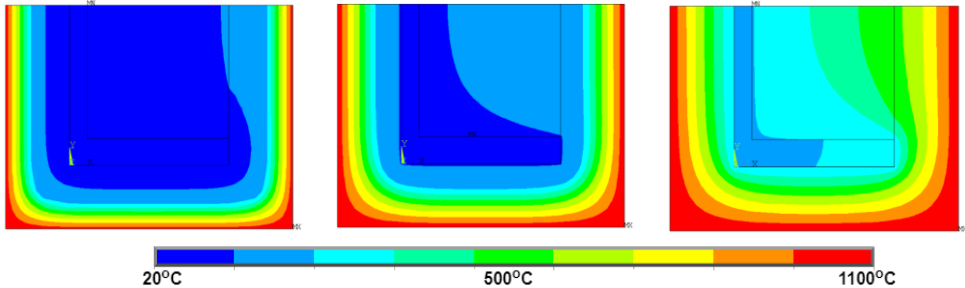
ISO 834



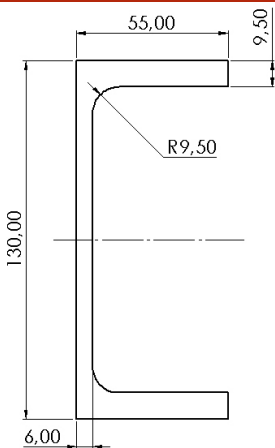
Elementos Exteriores



Hidrocabonetos

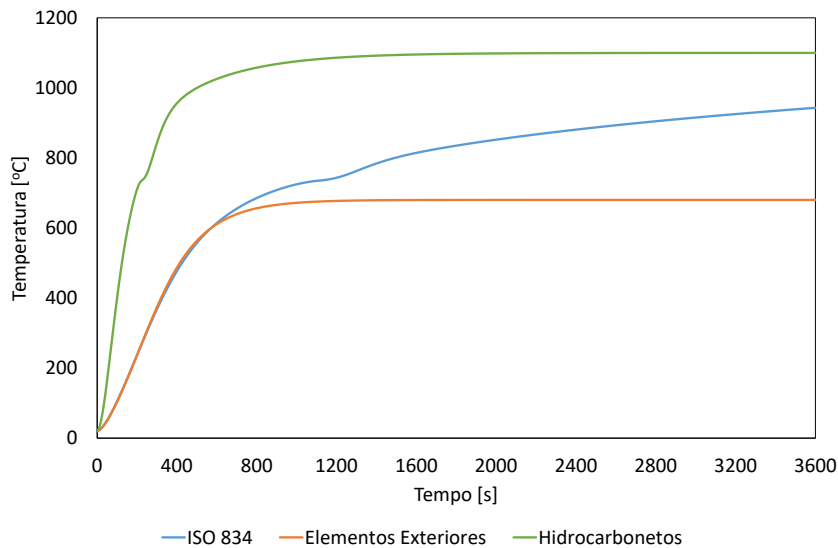


UAP 130

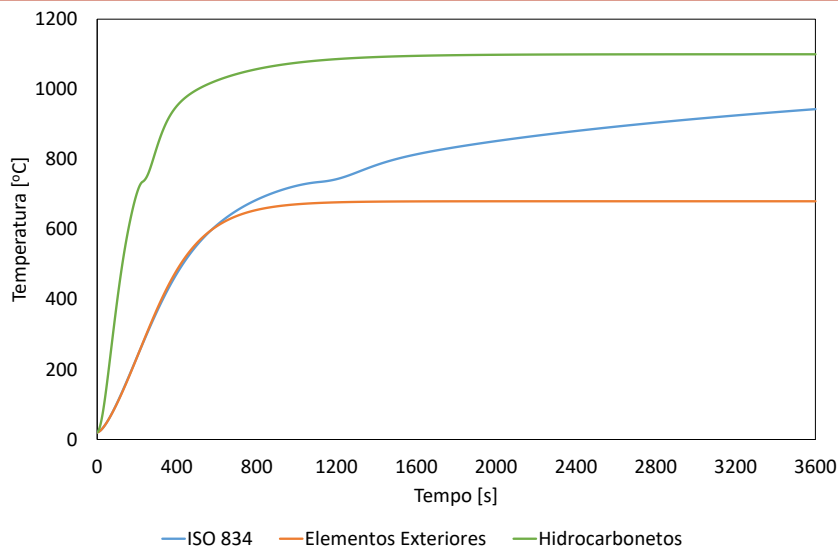


Perímetro [m]	0,4598
Área [m²]	0,00175
Fator de massividade [m ⁻¹]	262,76
Comprimento Característico [m]	0,0038

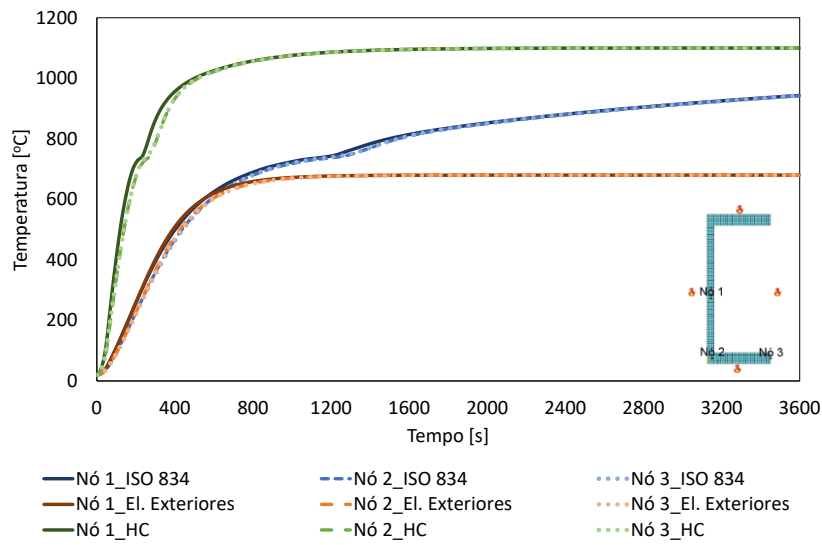
Método Simplificado do Eurocódigo 3



Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)

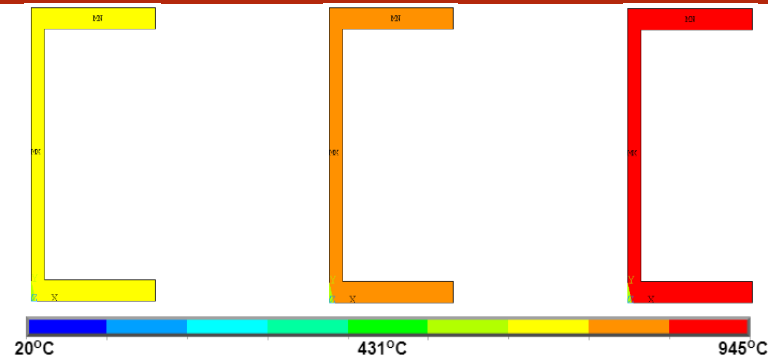


900 segundos

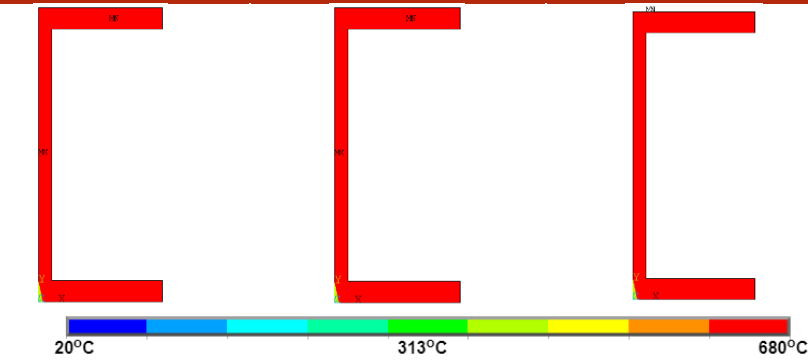
1800 segundos

3600 segundos

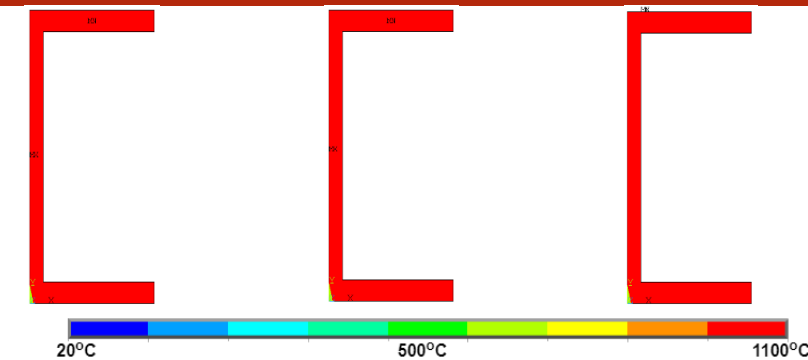
ISO 834



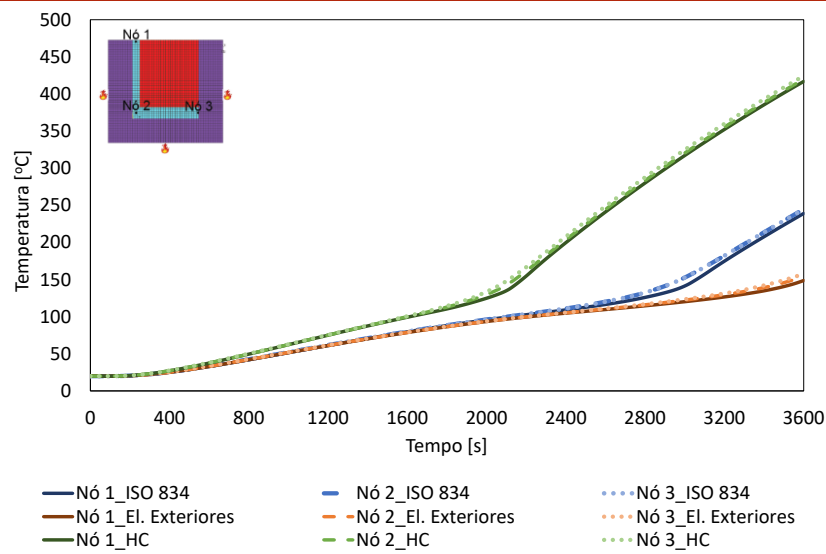
Elementos
Exteriores



Hidrocarbonetos



Método Numérico (Perfil Protegido)

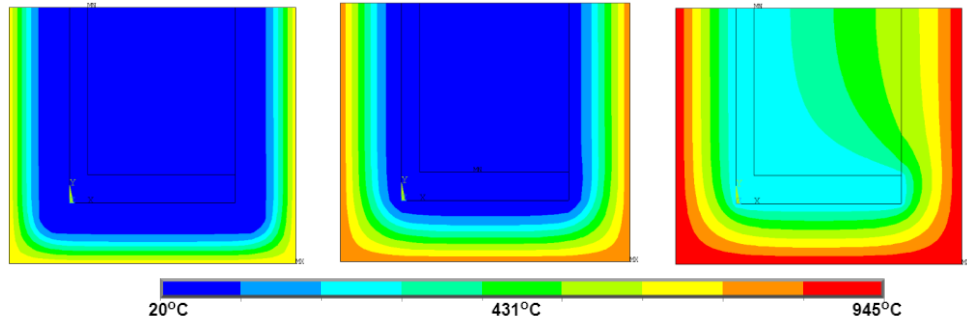


900 segundos

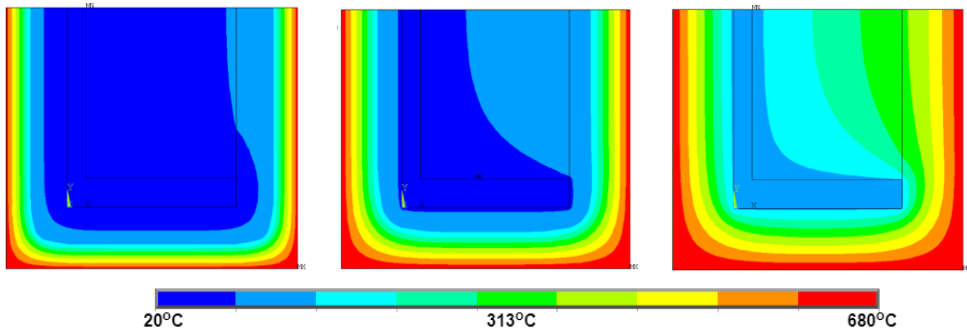
1800 segundos

3600 segundos

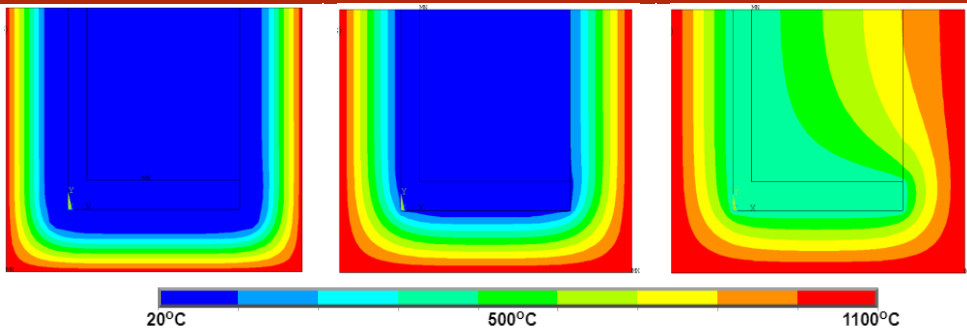
ISO 834



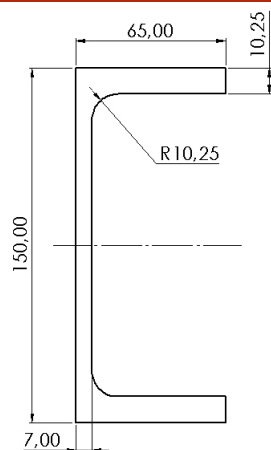
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

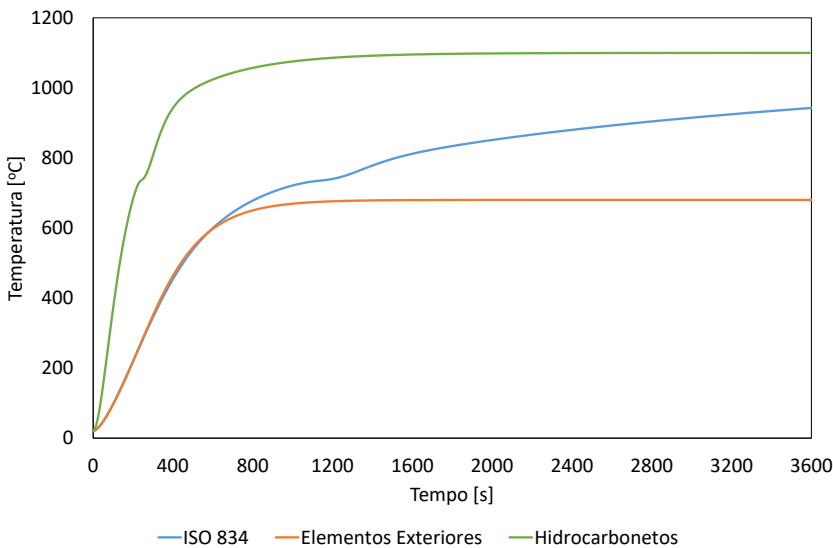


UAP 150

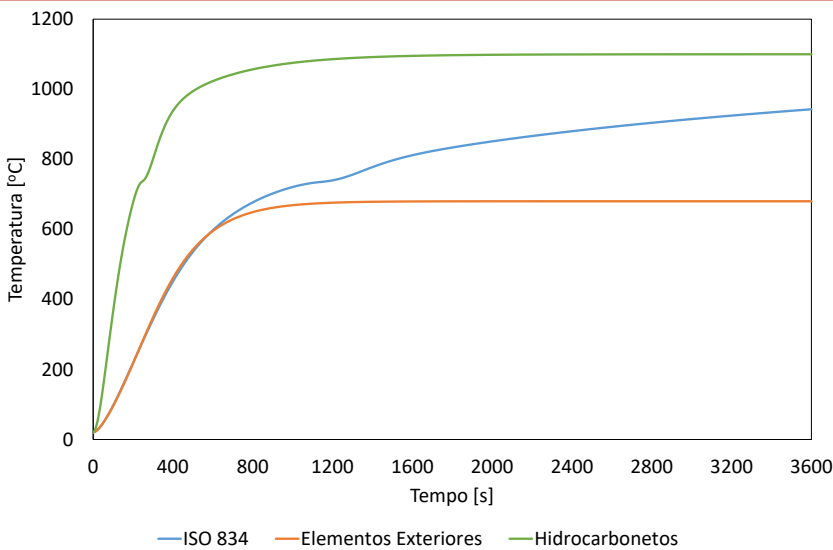


Perímetro [m]	0,5372
Área [m ²]	0,002284
Fator de massividade [m ⁻¹]	235,20
Comprimento Característico [m]	0,0042

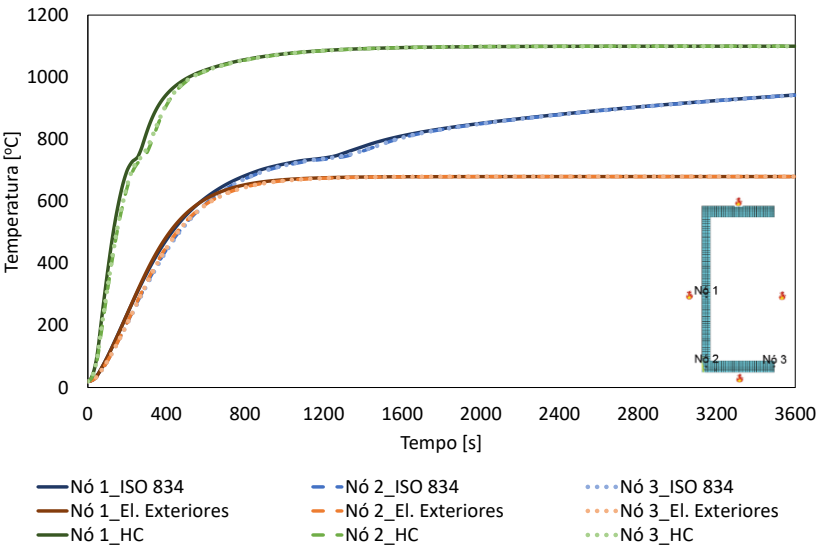
Método Simplificado do Eurocódigo 3



Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)

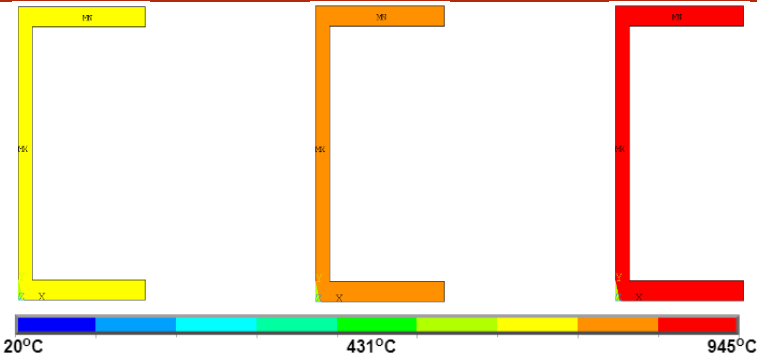


900 segundos

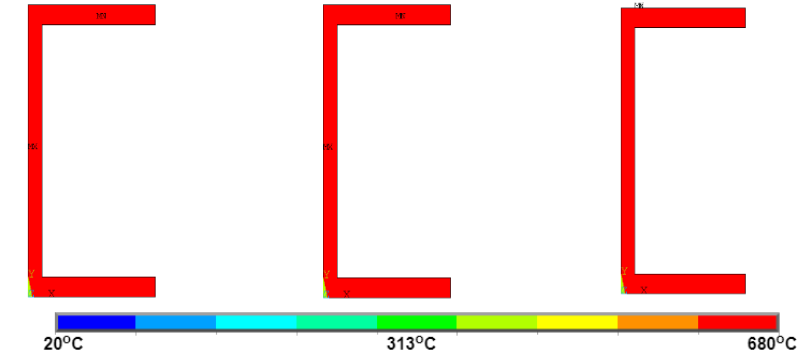
1800 segundos

3600 segundos

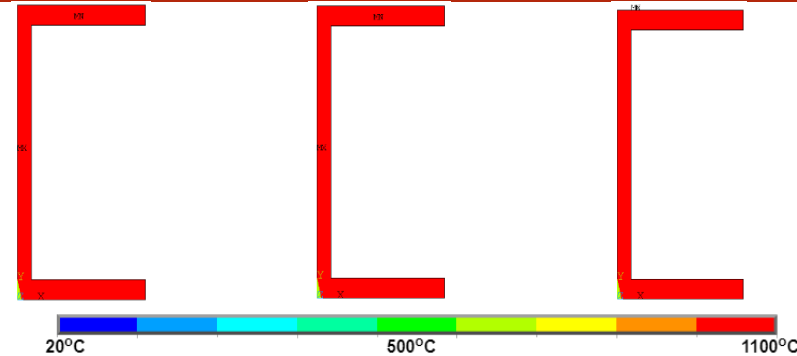
ISO 834



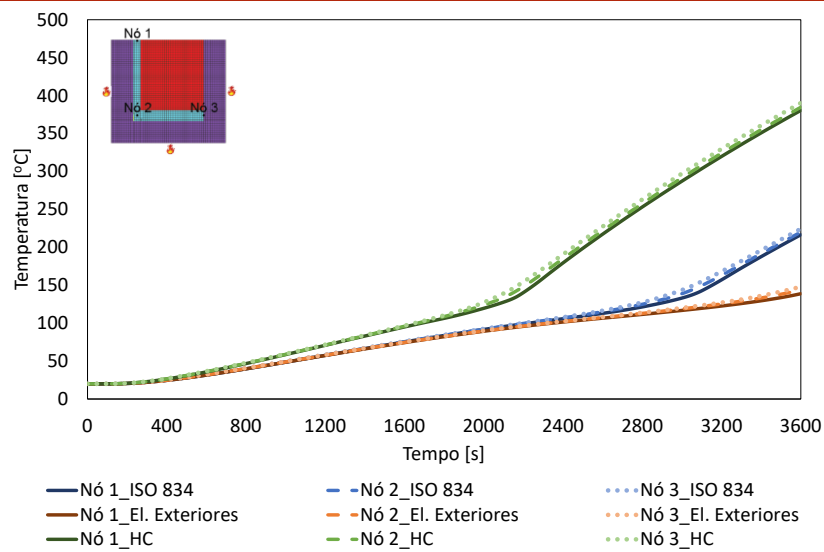
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos



Método Numérico (Perfil Protegido)

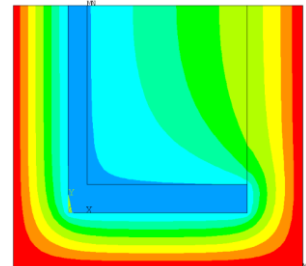
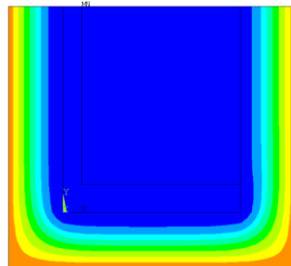
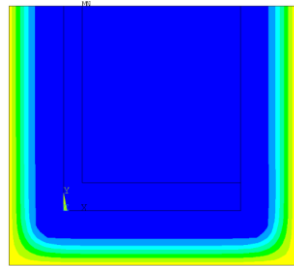


900 segundos

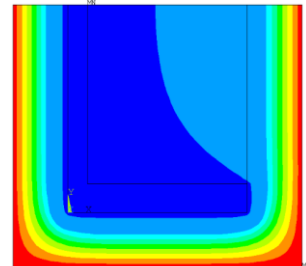
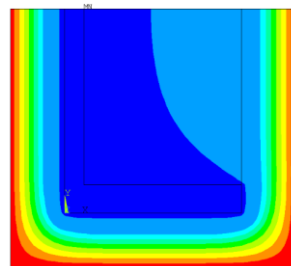
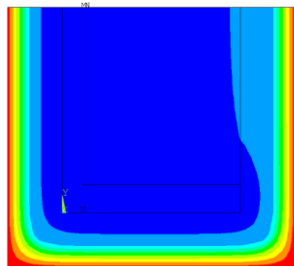
1800 segundos

3600 segundos

ISO 834

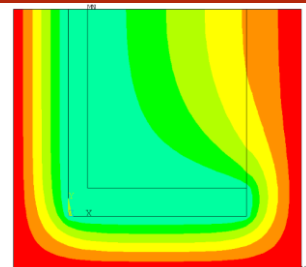
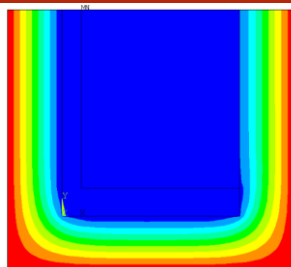
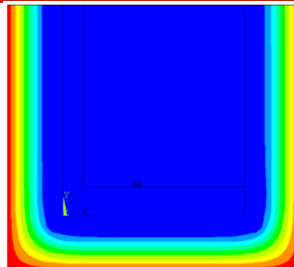


20°C 431°C 945°C

 Elementos
Exteriores


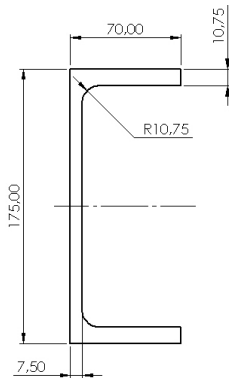
20°C 313°C 680°C

Hidrocarbonetos



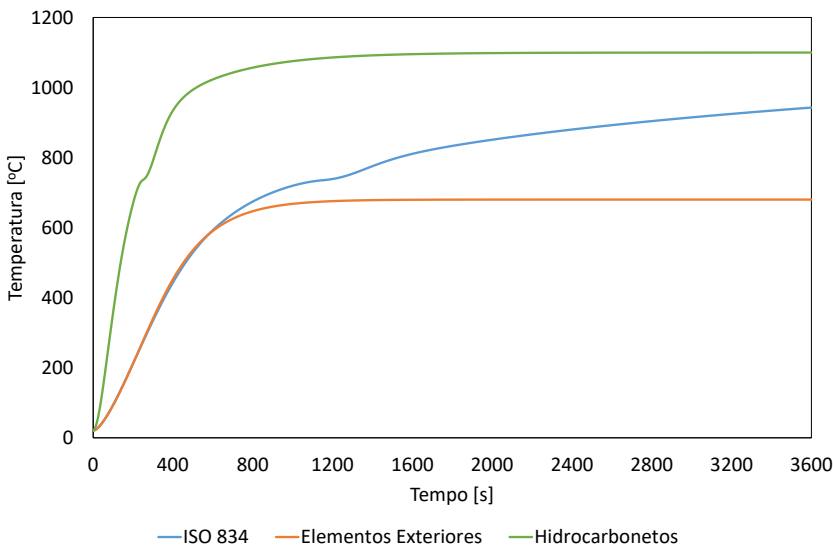
20°C 500°C 1100°C

UAP 175

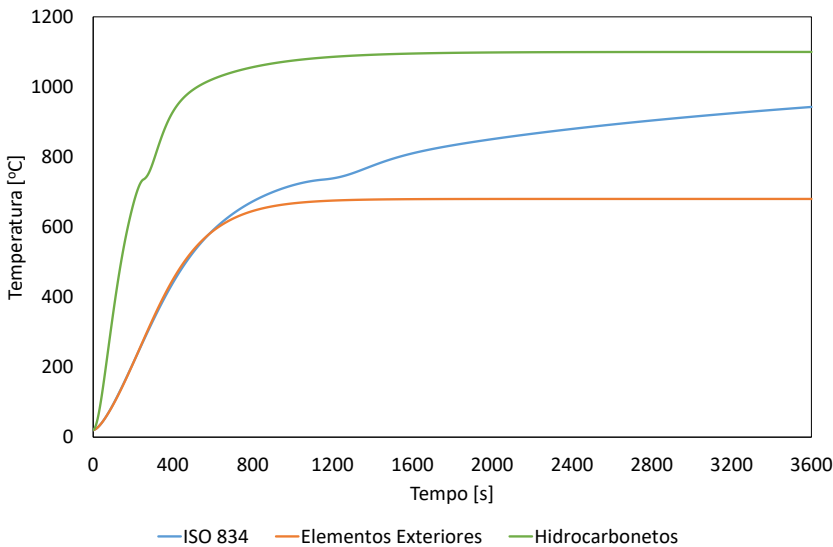


Perímetro [m]	0,60577
Área [m²]	0,002706
Fator de massividade [m ⁻¹]	223,86
Comprimento Característico [m]	0,0045

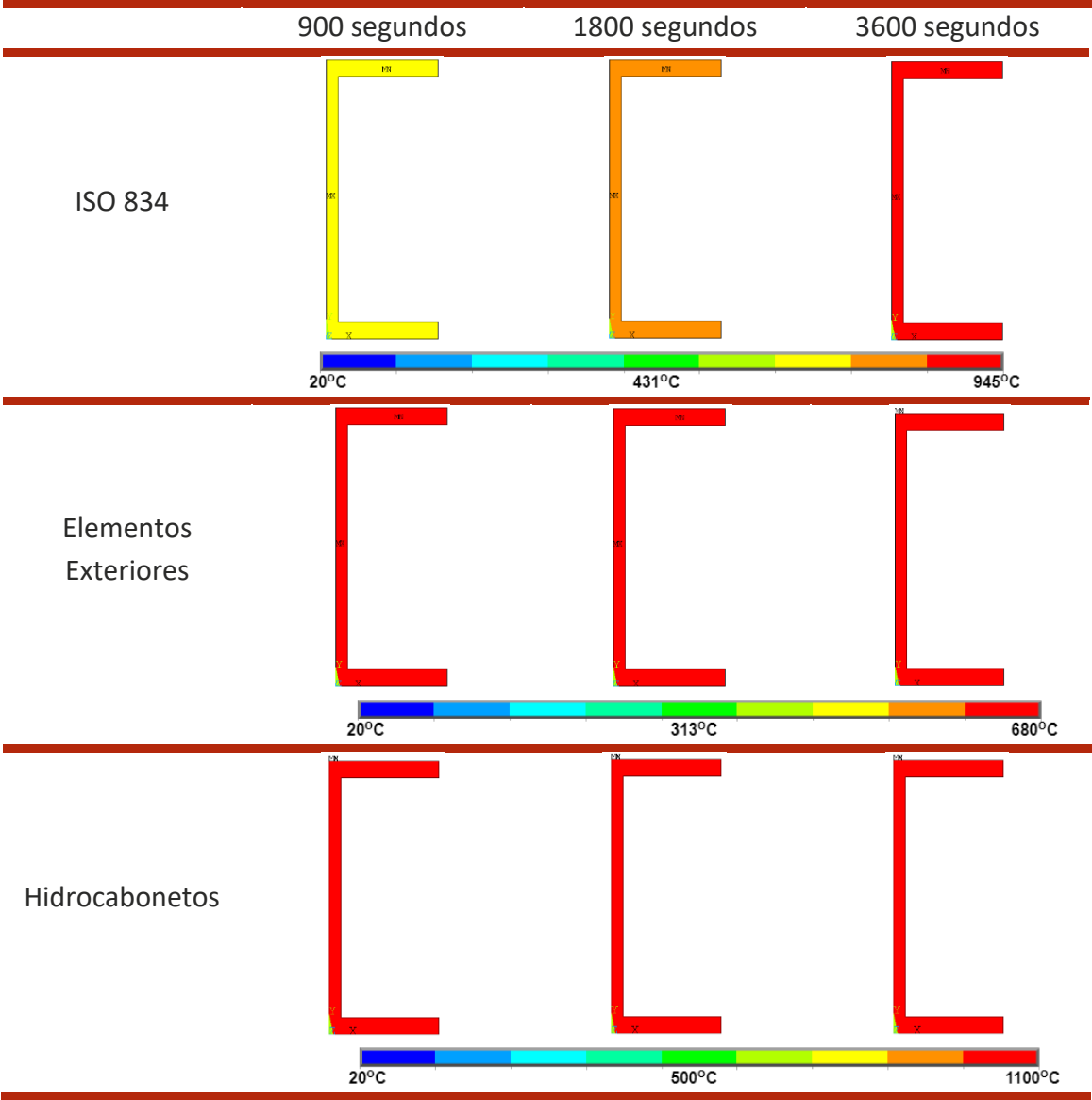
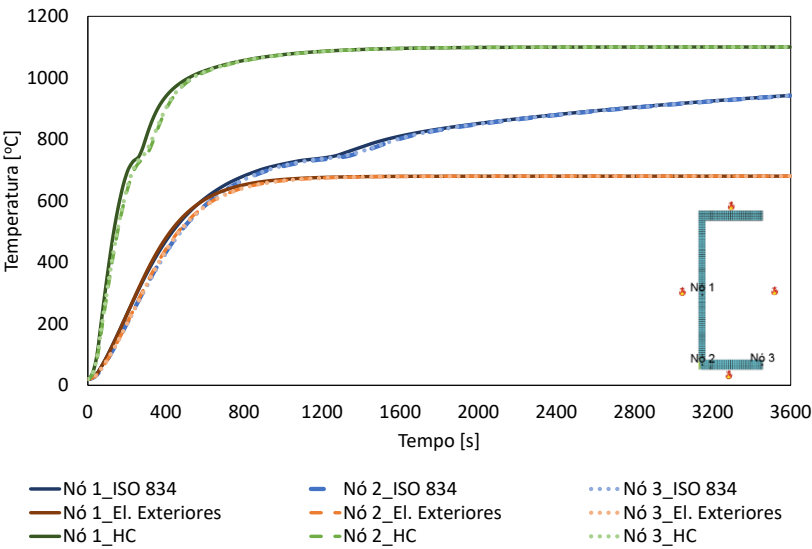
Método Simplificado do Eurocódigo 3



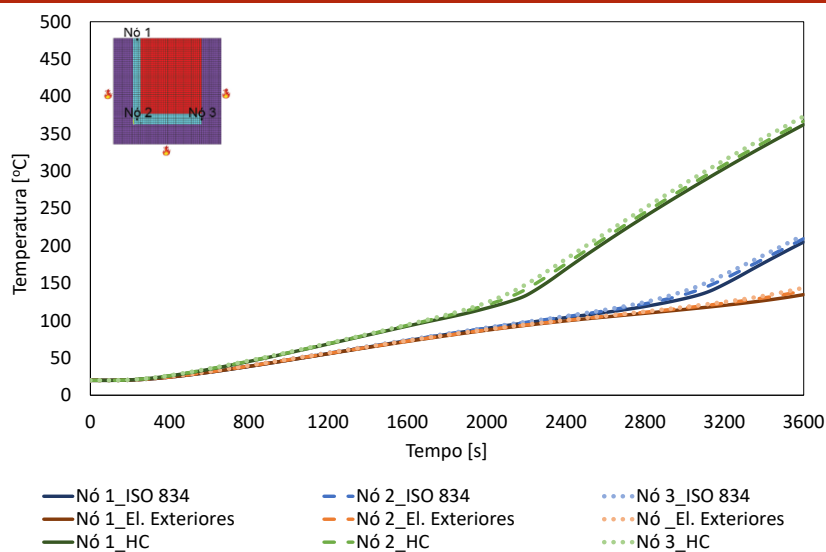
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

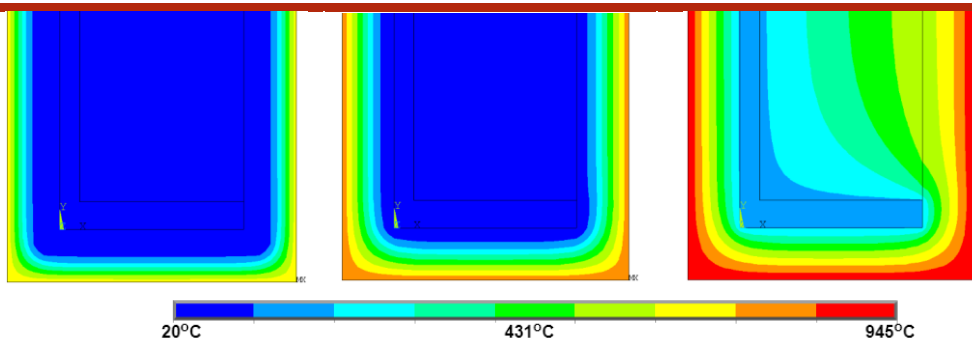
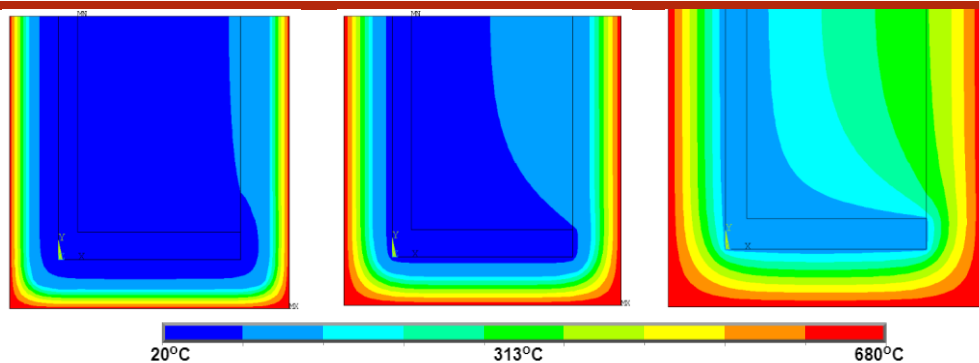


900 segundos

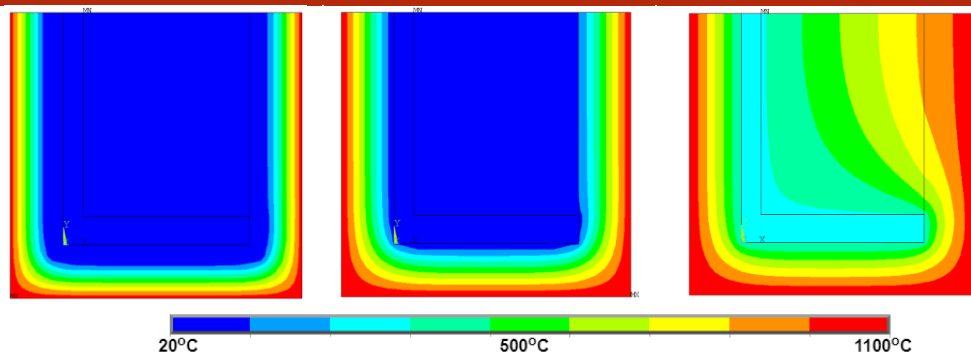
1800 segundos

3600 segundos

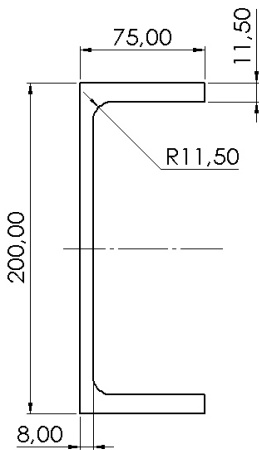
ISO 834

Elementos
Exteriores

Hidrocarbonetos

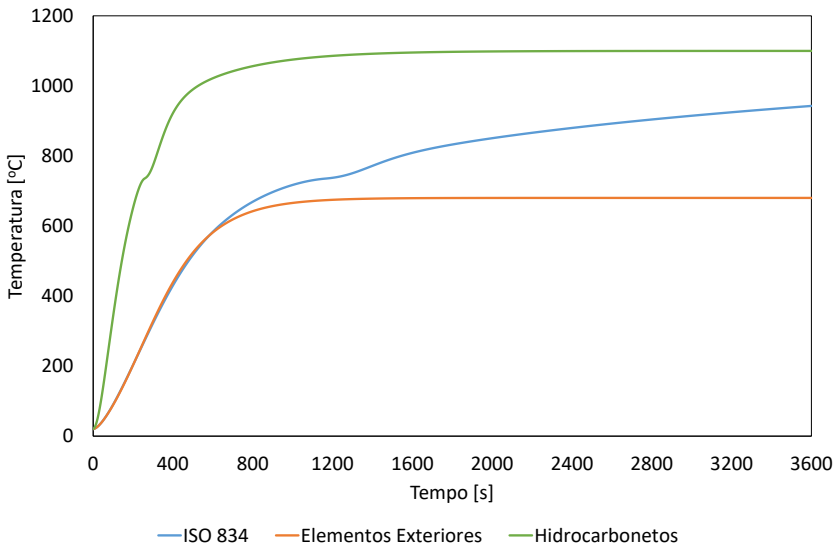


UAP 200

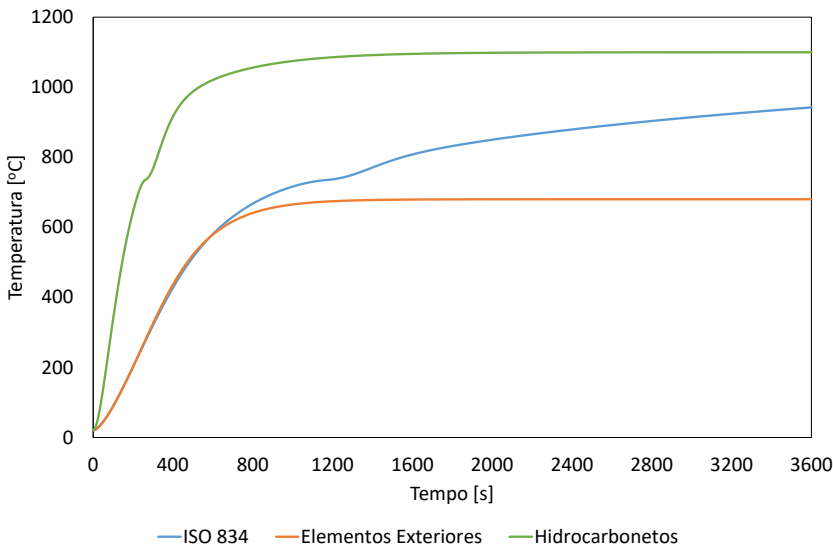


Perímetro [m]	0,67412
Área [m²]	0,003198
Fator de massividade [m ⁻¹]	210,79
Comprimento Característico [m]	0,0047

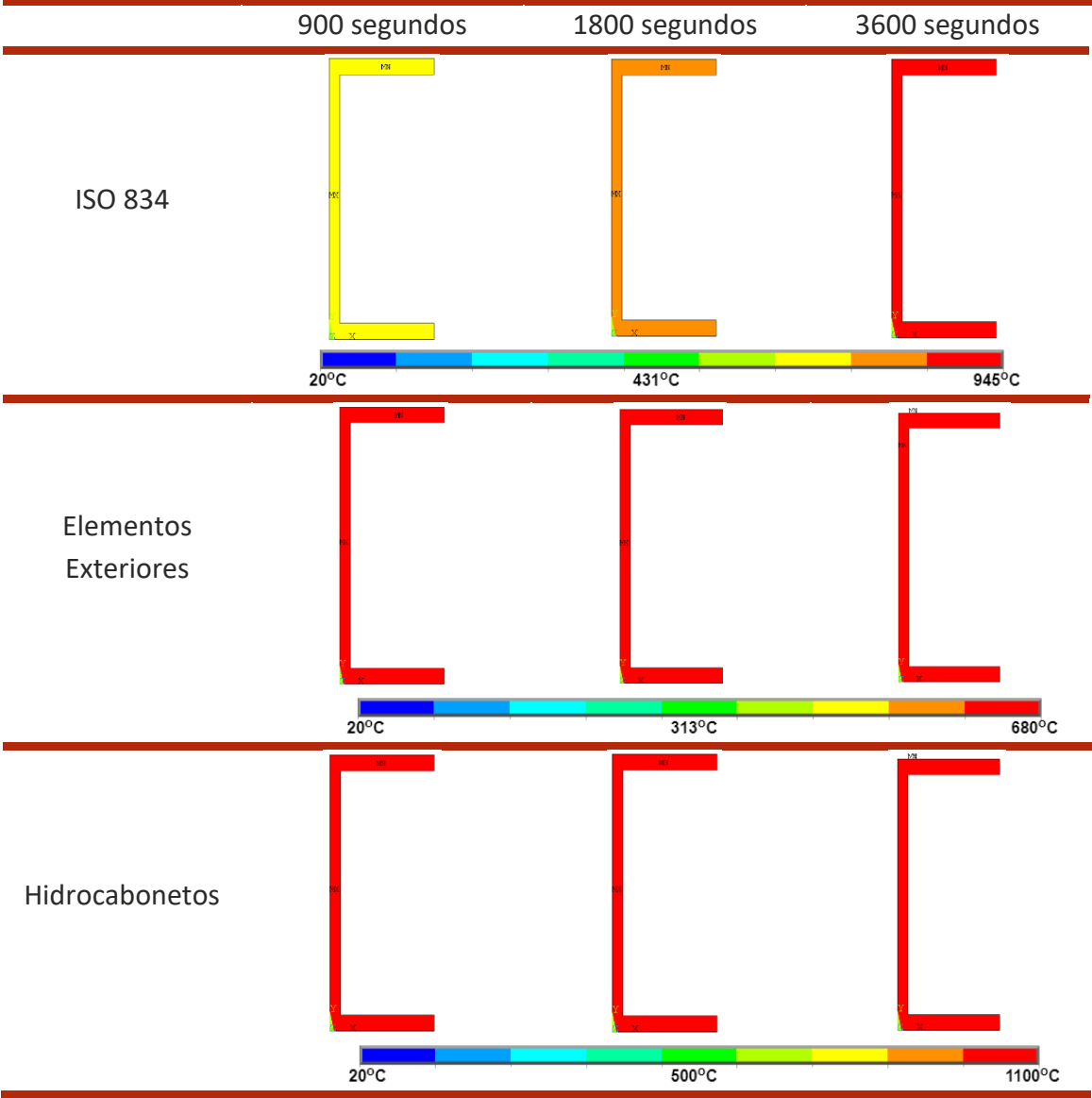
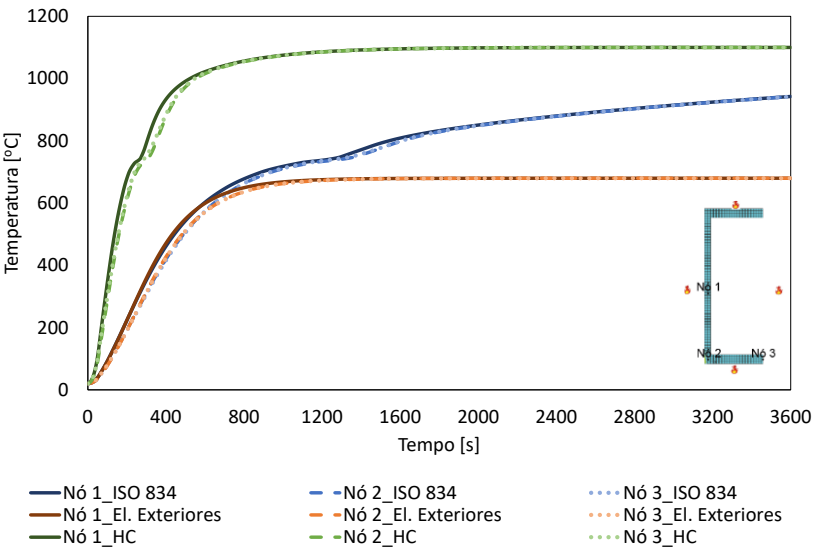
Método Simplificado do Eurocódigo 3



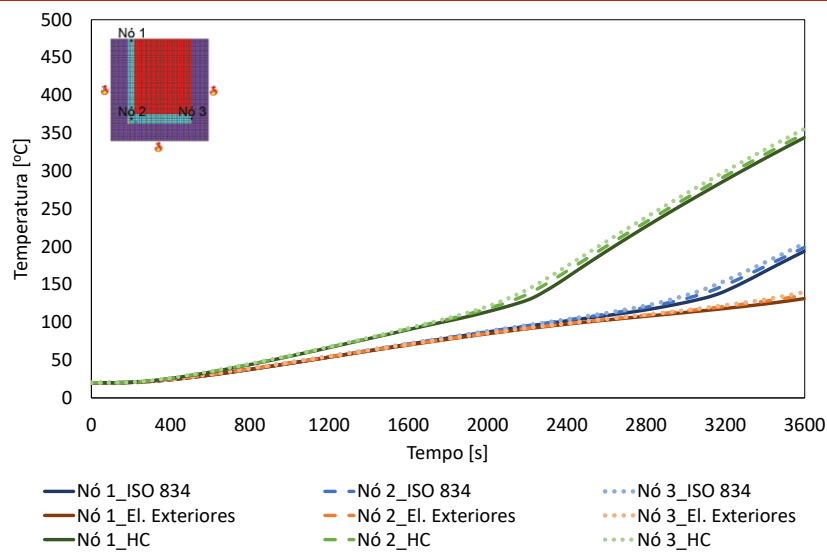
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

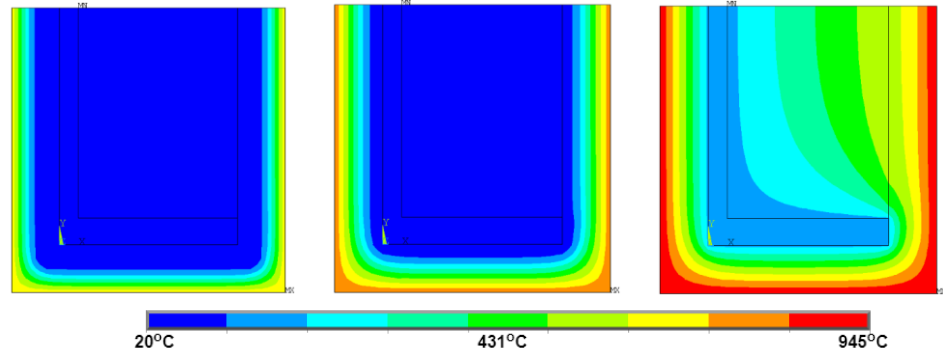


900 segundos

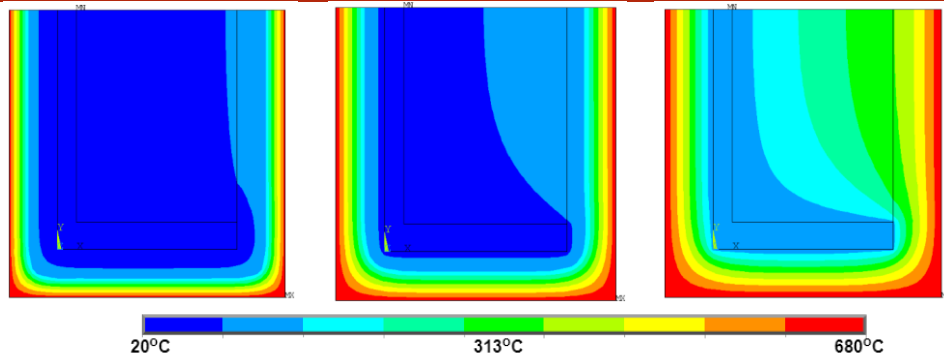
1800 segundos

3600 segundos

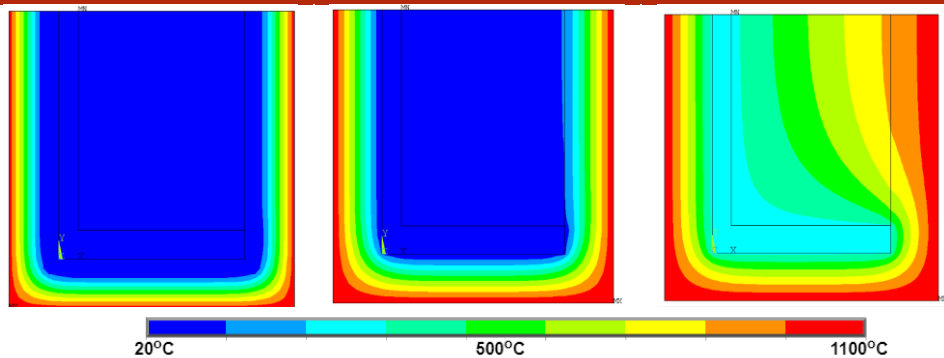
ISO 834



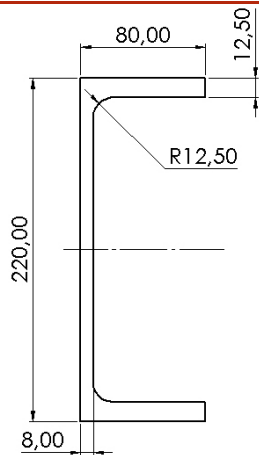
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

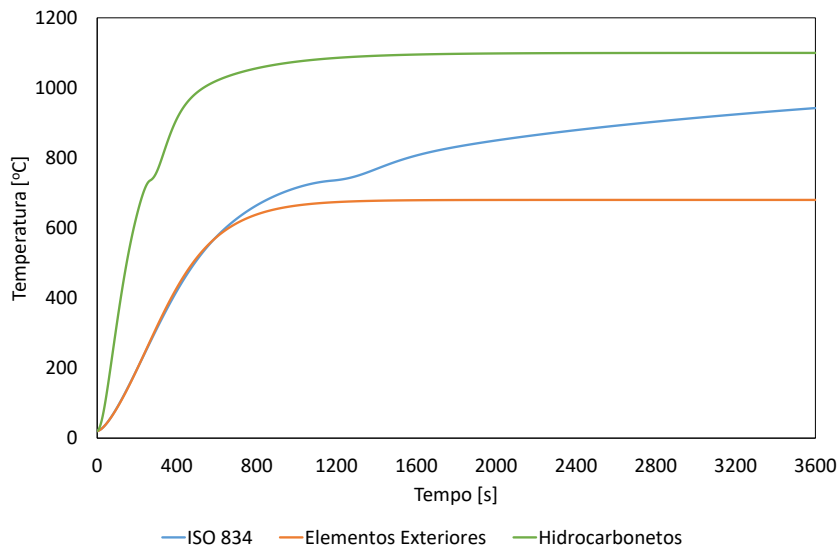


UAP 220

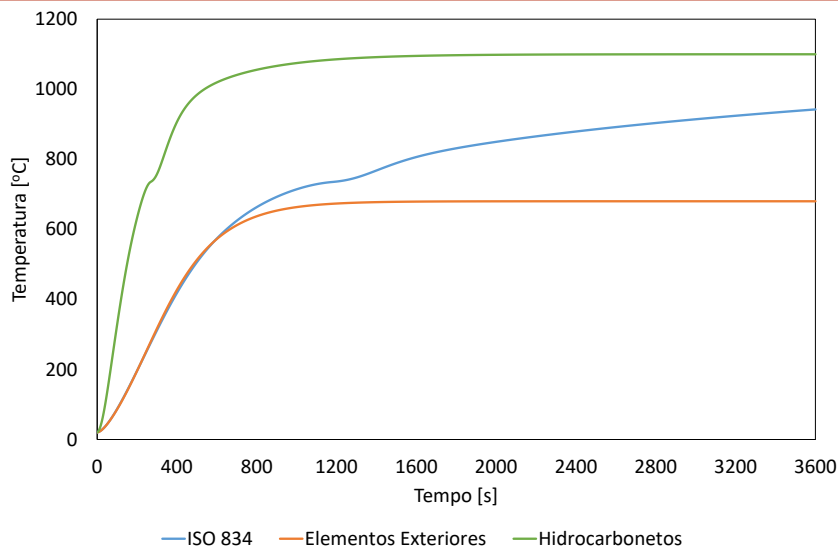


Perimetro [m]	0,73327
Área [m ²]	0,003627
Fator de massividade [m ⁻¹]	202.17
Comprimento Característico [m]	0,0049

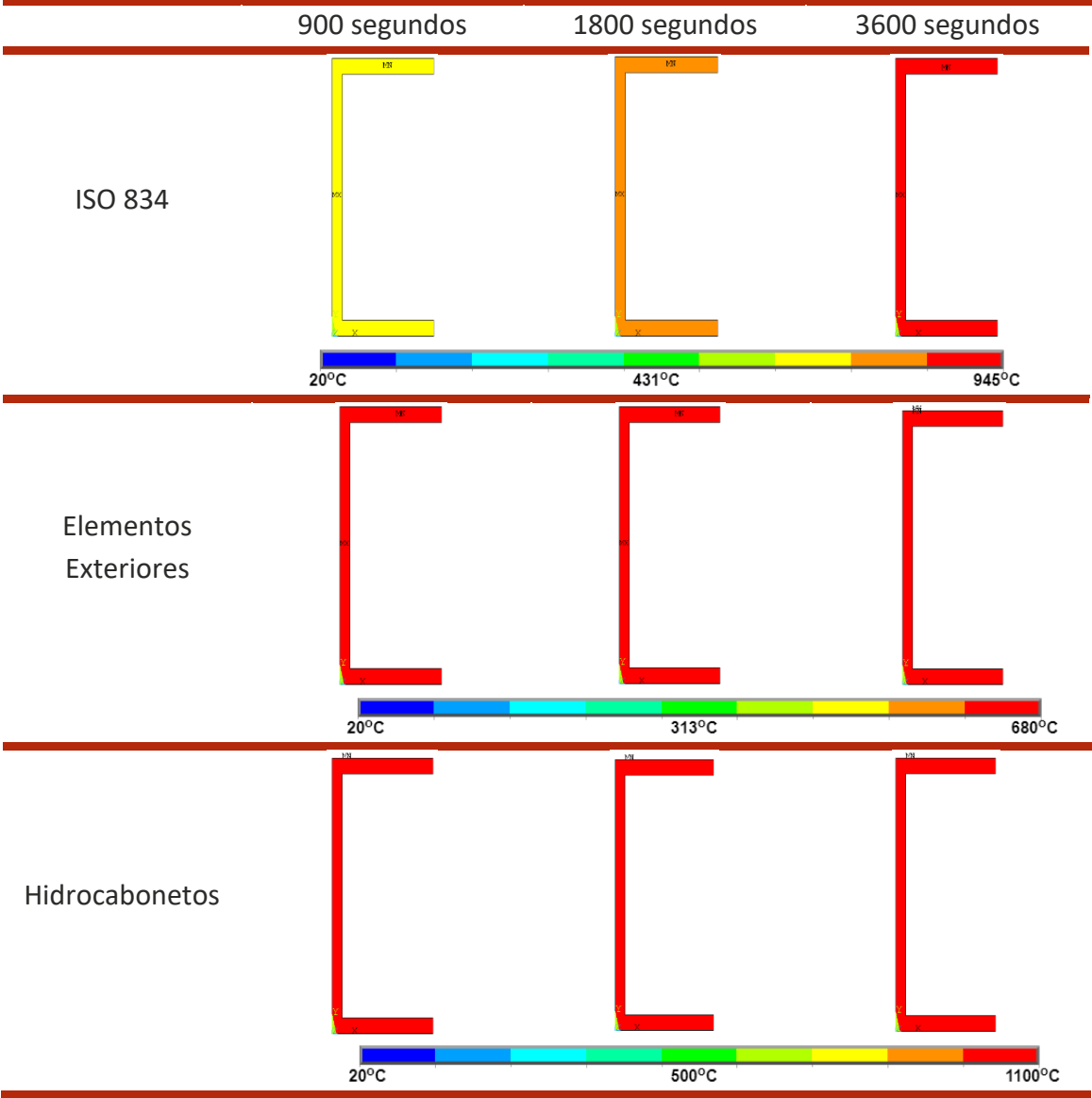
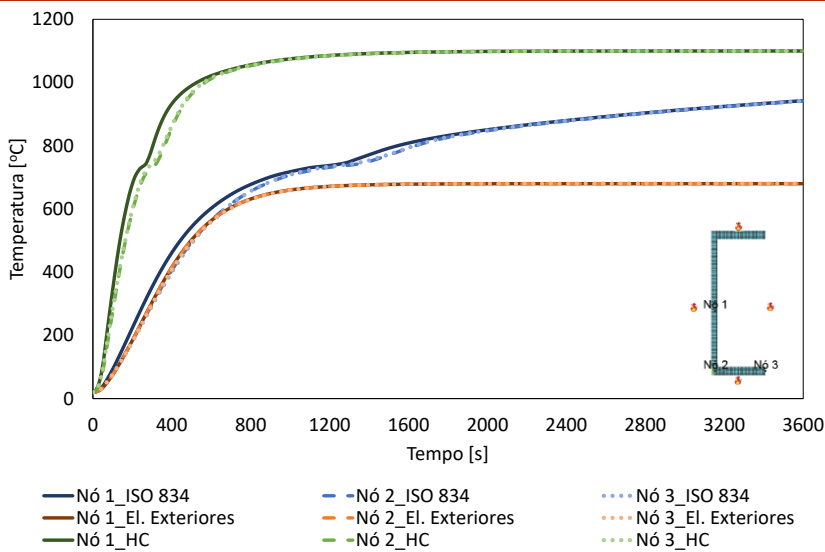
Método Simplificado do Eurocódigo 3



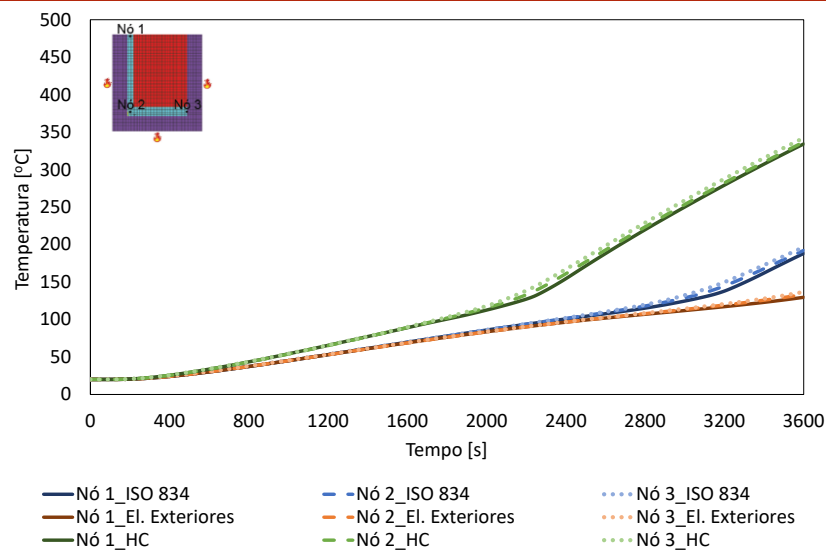
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

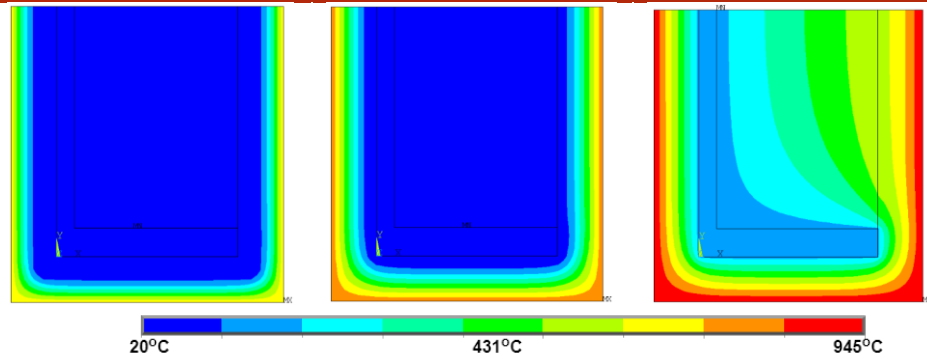


900 segundos

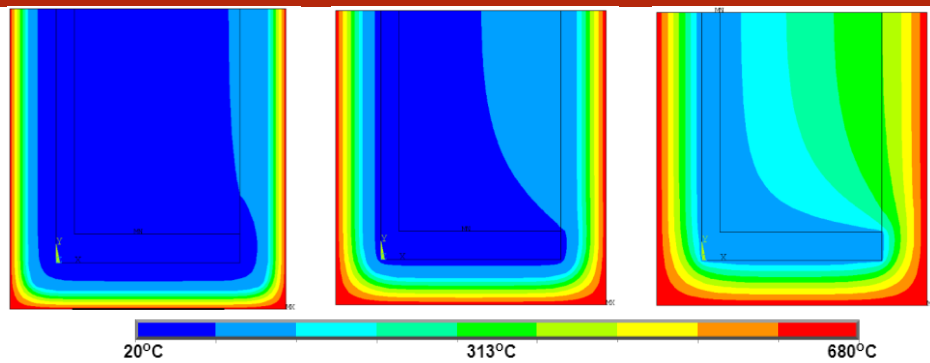
1800 segundos

3600 segundos

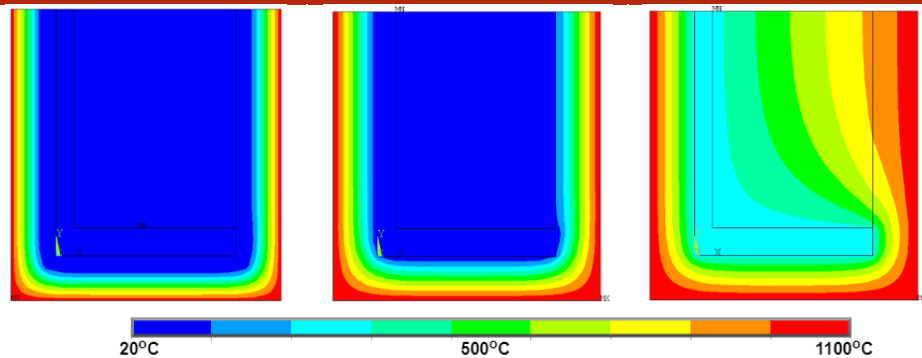
ISO 834



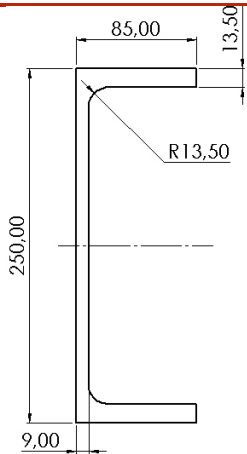
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

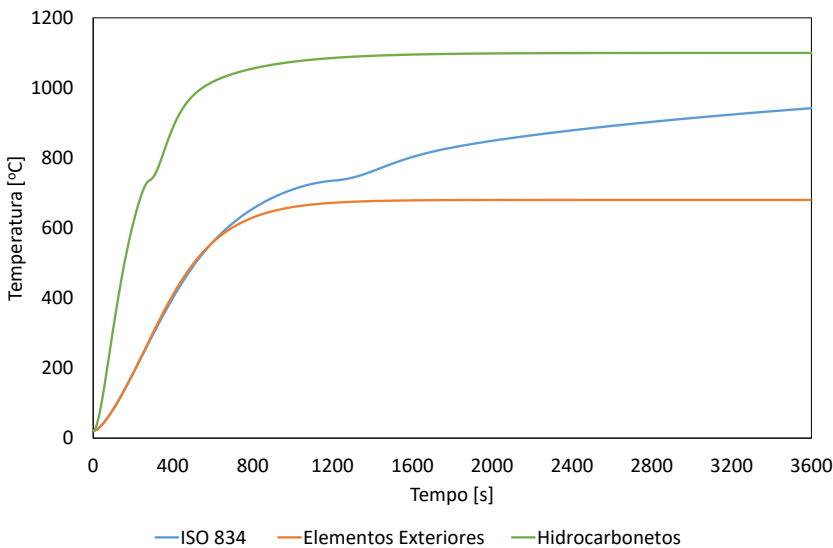


UAP 250

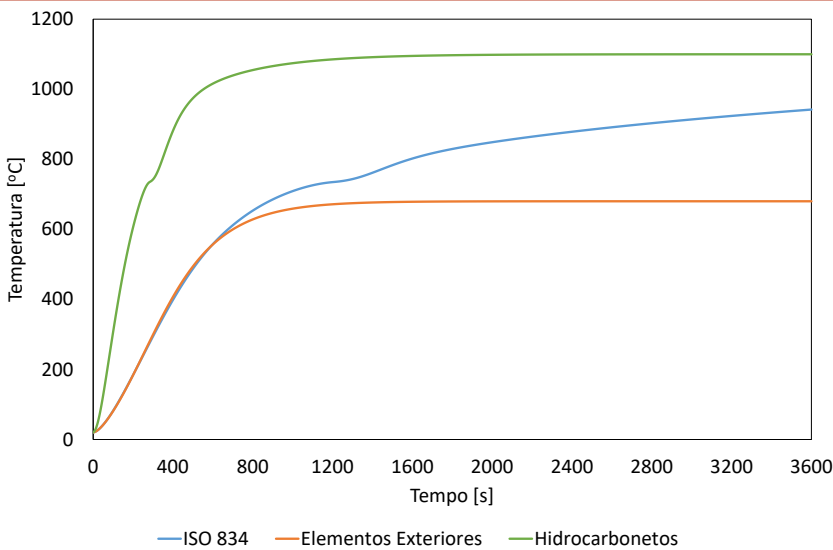


Perímetro [m]	0,81047
Área [m ²]	0,00438
Fator de massividade [m ⁻¹]	185,025
Comprimento Característico [m]	0,0054

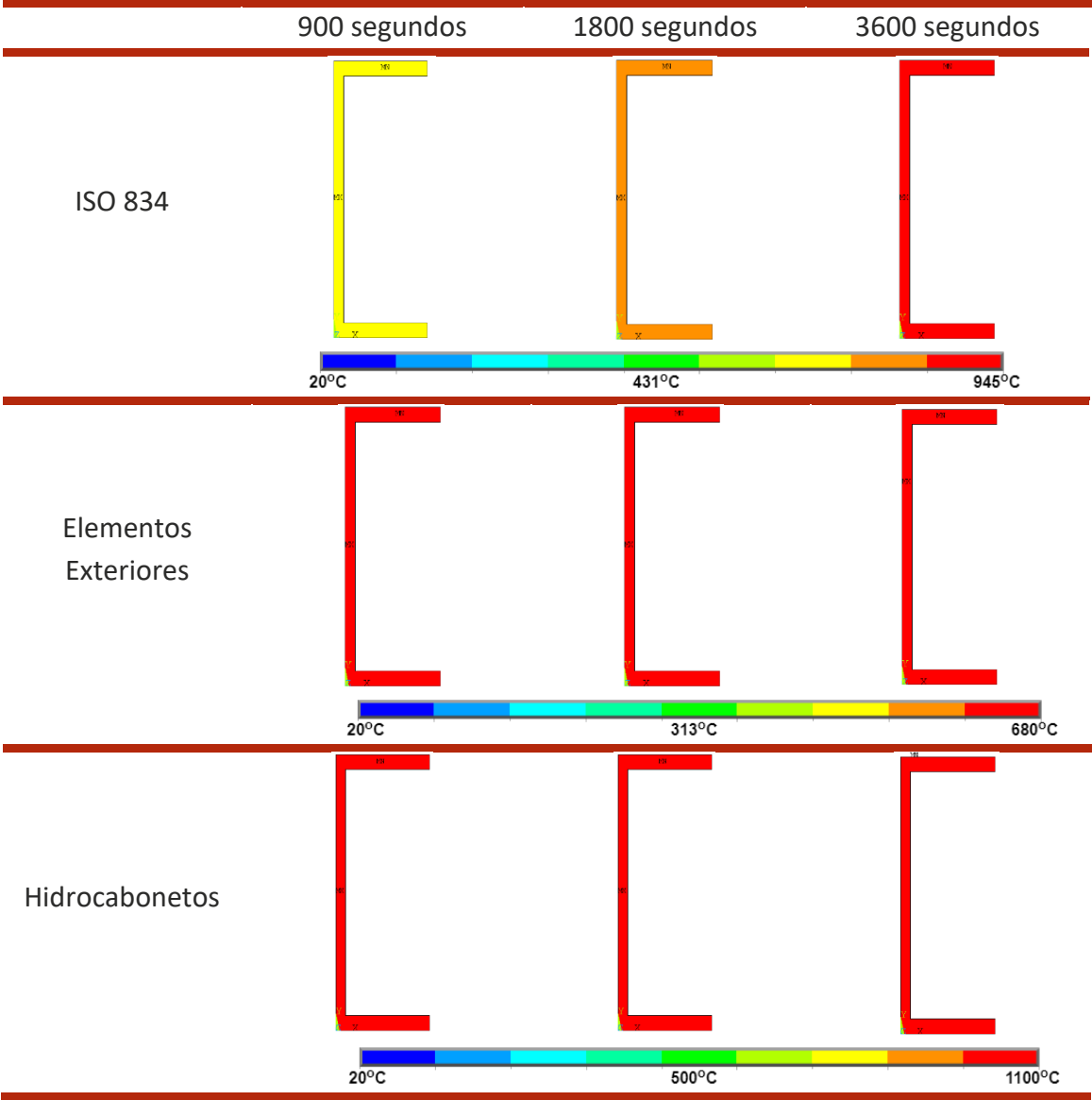
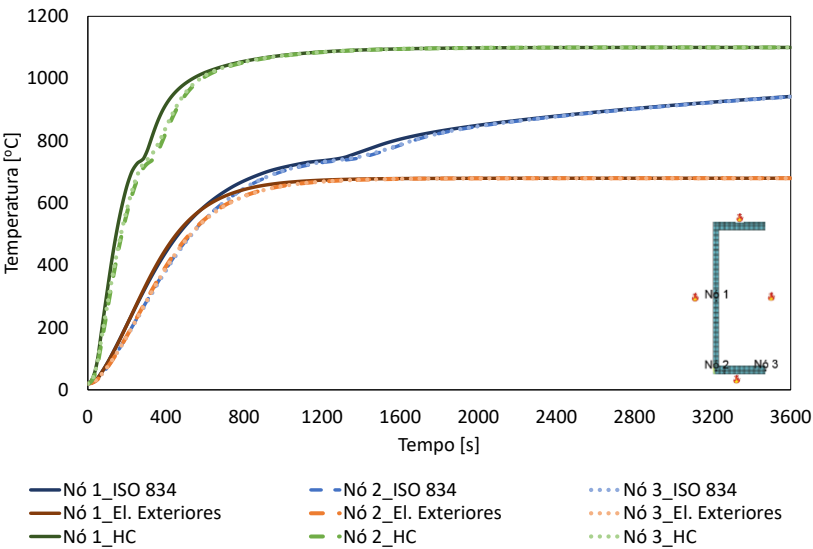
Método Simplificado do Eurocódigo 3



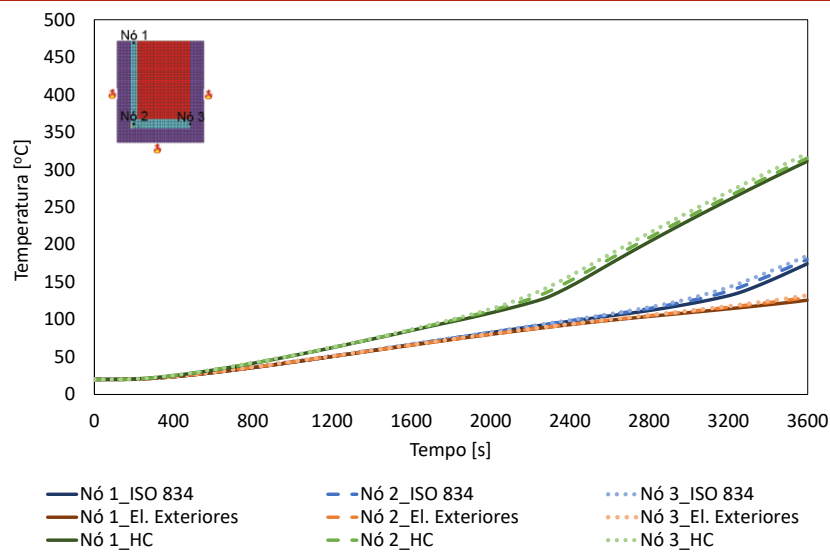
Método da Capacitância Global



Método Numérico (Perfil Não Protegido)



Método Numérico (Perfil Protegido)

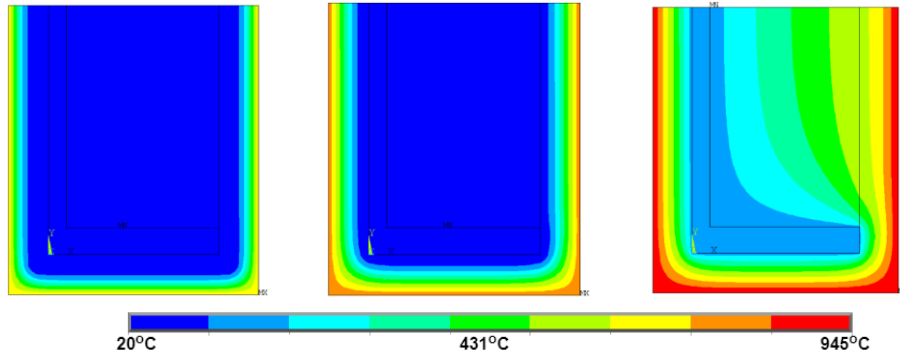


900 segundos

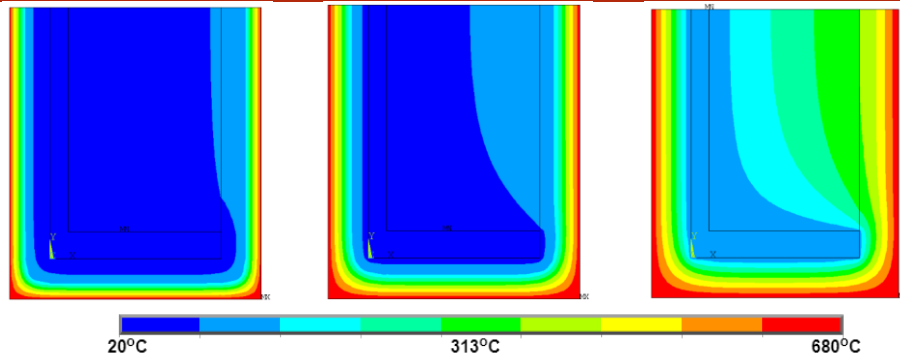
1800 segundos

3600 segundos

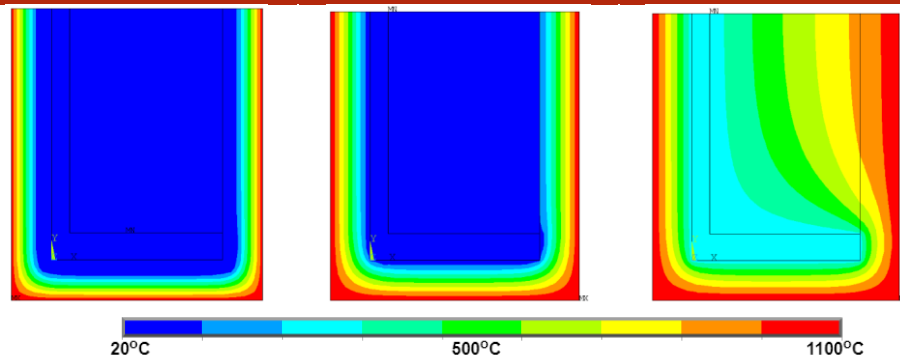
ISO 834



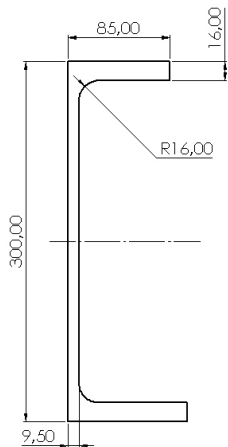
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos

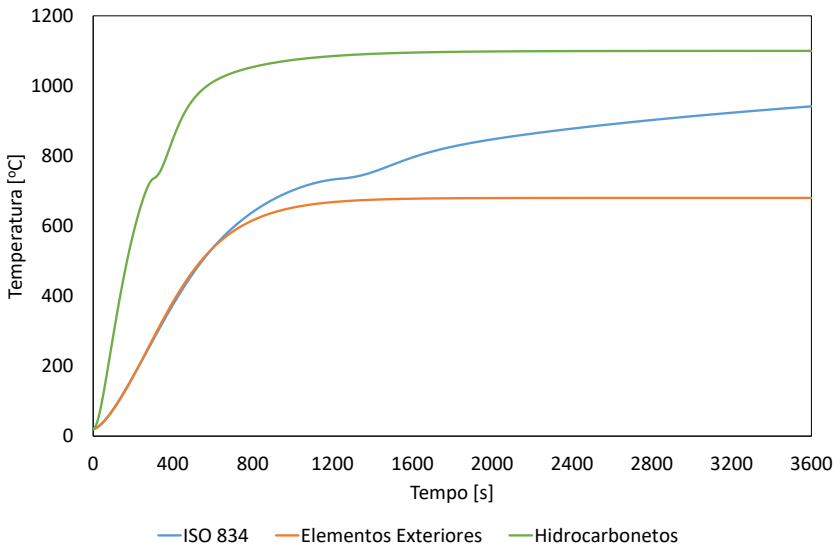


UAP 300

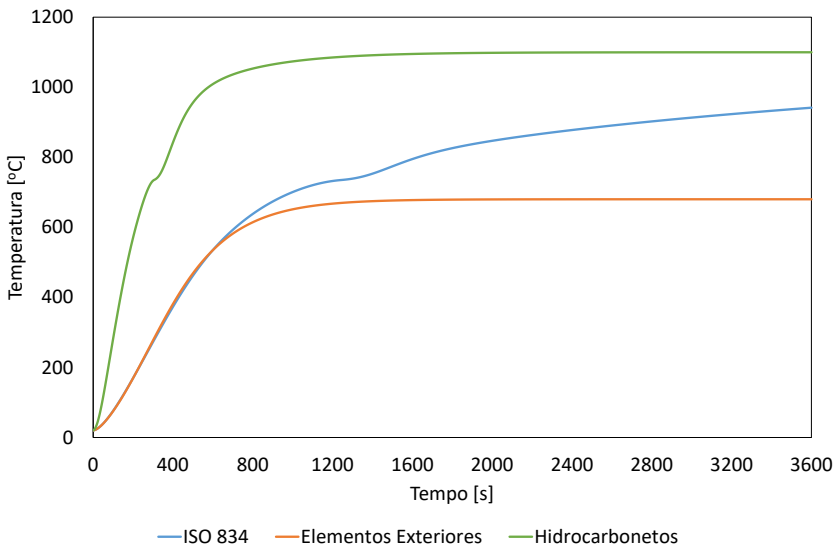


Perímetro [m]	0,96726
Área [m²]	0,005856
Fator de massividade [m ⁻¹]	165,17
Comprimento Característico [m]	0,0060

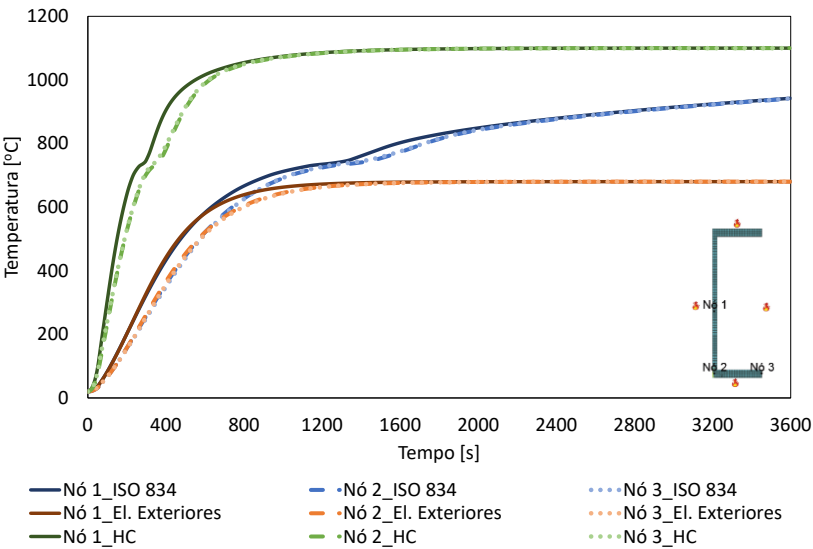
Método Simplificado do Eurocódigo 3



Método da Capacitância Global

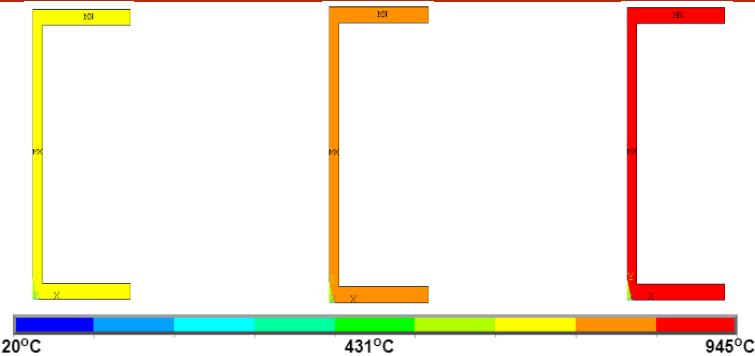


Método Numérico (Perfil Não Protegido)

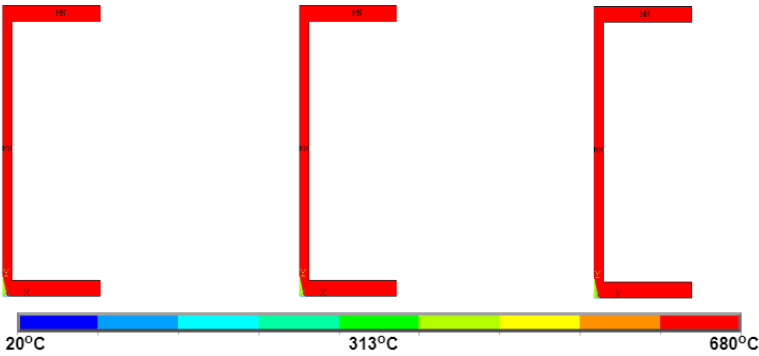


900 segundos 1800 segundos 3600 segundos

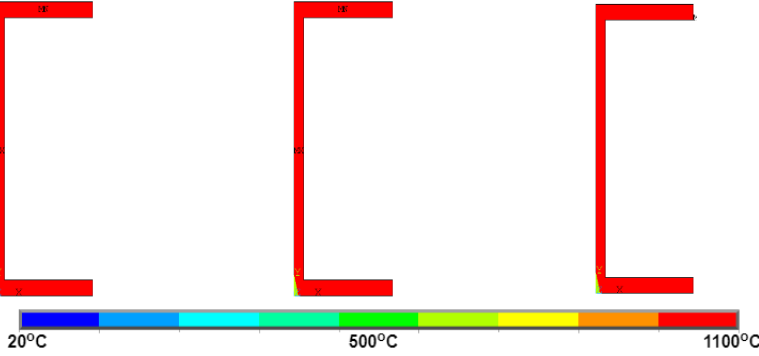
ISO 834



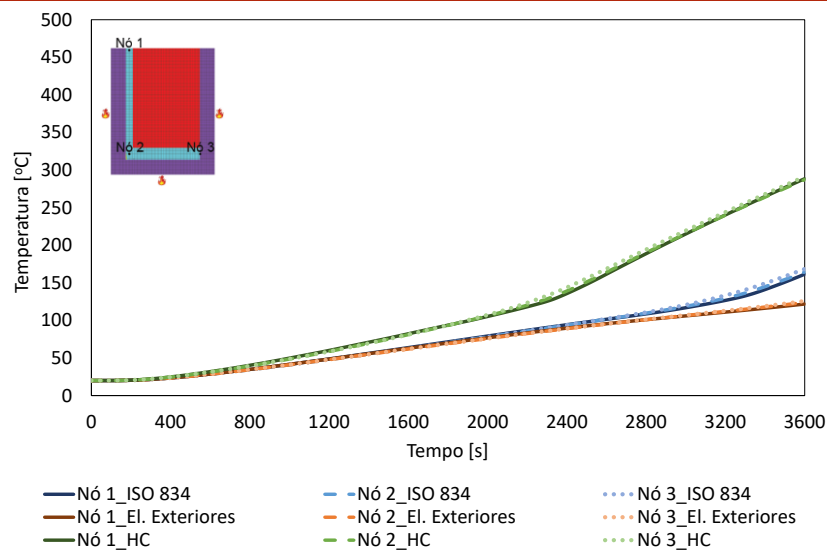
Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos



Método Numérico (Perfil Protegido)

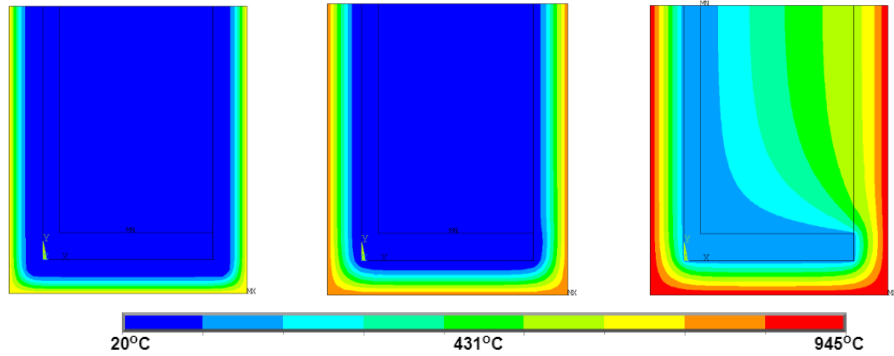


900 segundos

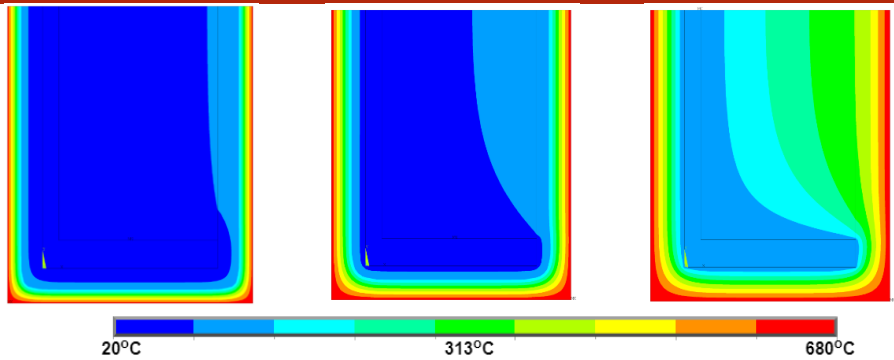
1800 segundos

3600 segundos

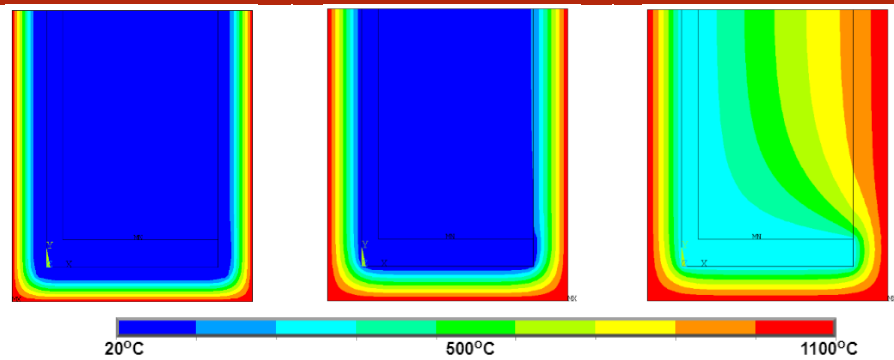
ISO 834



Elementos Exteriores



Hidrocarbonetos



10.3 ANEXO 3

Neste anexo são apresentados ábacos para o cálculo da resistência ao fogo em função do fator de massividade, através do Método Simplificado proposto pelo Eurocódigo 3.

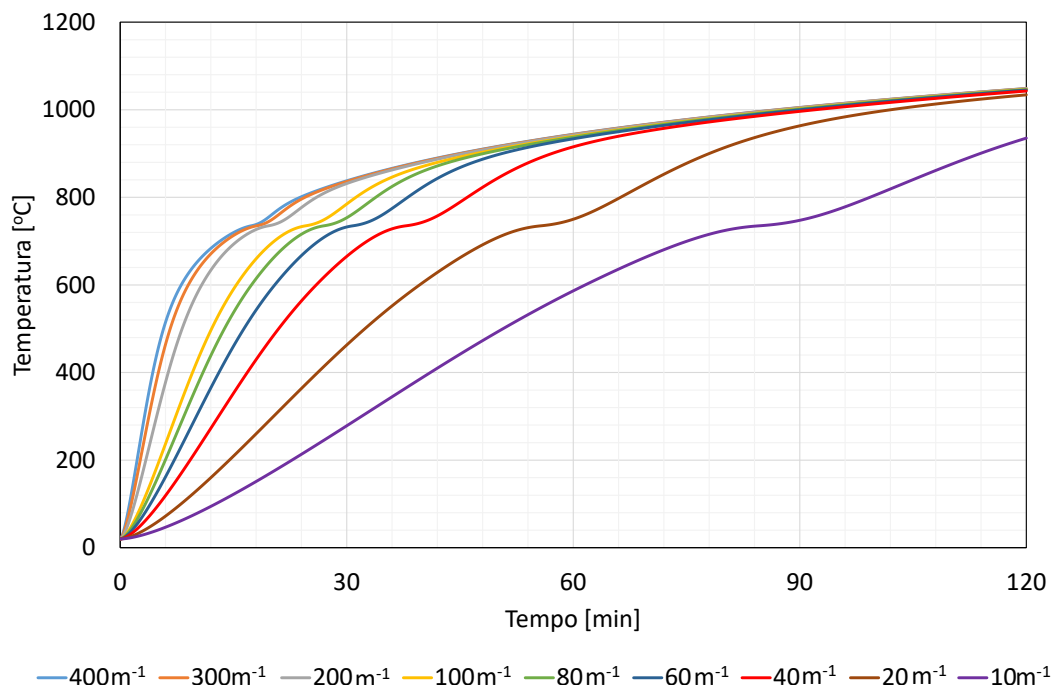


Figura 10.1 - Ábaco para dimensionamento de elementos estruturais de aço sujeitos a curva ISO 834

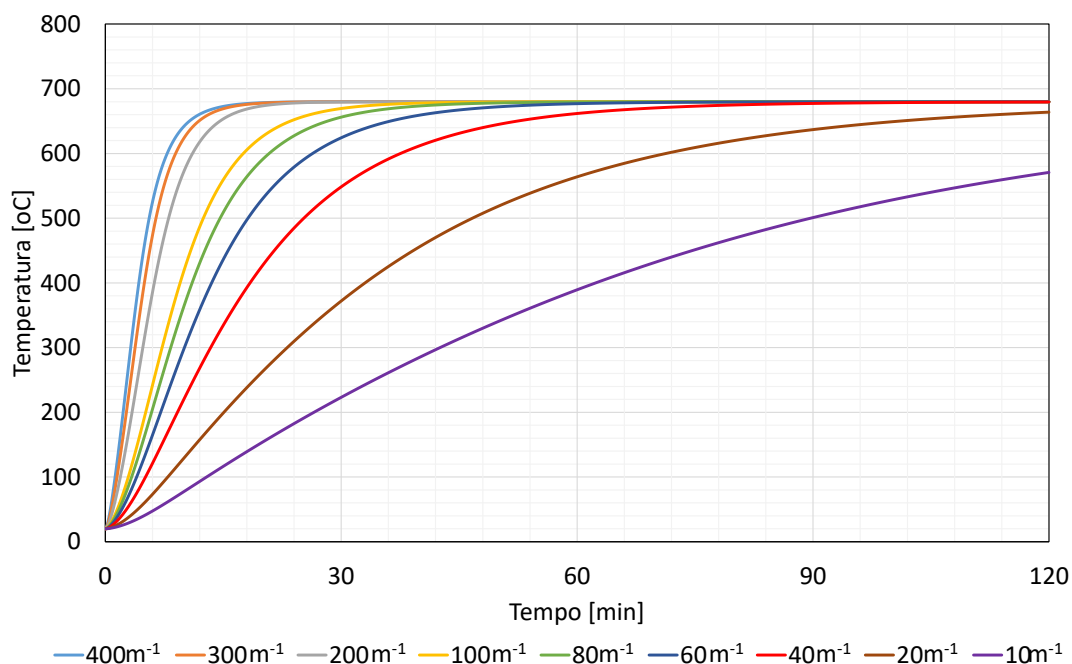


Figura 10.2 - Ábaco para dimensionamento de elementos estruturais de aço sujeitos a curva de Elementos Exteriores

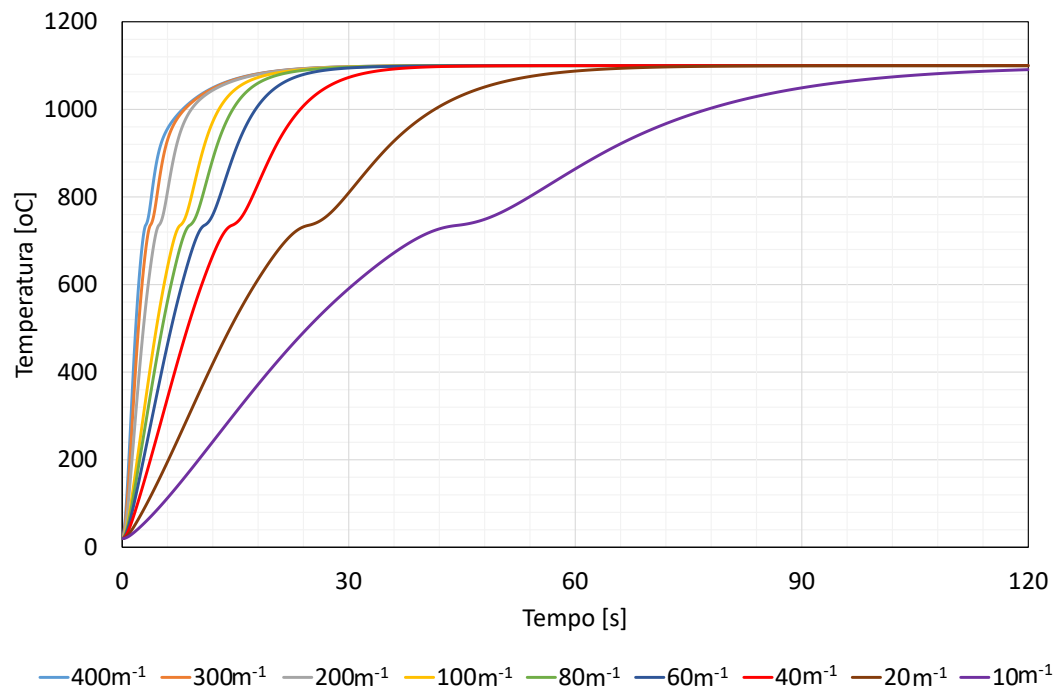


Figura 10.3 - Ábaco para dimensionamento de elementos estruturais de aço sujeitos a curva de Hidrocarbonetos

10.4 ANEXO 4

Neste anexo são apresentados os códigos em linguagem APDL para as curvas de incêndio nominal.

Tabela 10.5 - Código APDL para as diferentes curvas de incêndio nominal

ISO 834	Elementos Exteriores	Hidrocarbonetos
*DIM,ISO834,TABLE,61,1,1,,,	*DIM,ELEXT,TABLE,61,1,1,,,	*DIM,HC,TABLE,61,1,1,,,
*SET,ISO834(1,0,1),0,1,1,,,	*SET,ELEXT(1,0,1),0,1,1,,,	*SET,HC(1,0,1),0,1,1,,,
*SET,ISO834(1,1,1),20,1,1,,,	*SET,ELEXT(1,1,1),20,1,1,,,	*SET,HC(1,1,1),20,1,1,,,
*SET,ISO834(2,0,1),60,1,1,,,	*SET,ELEXT(2,0,1),60,1,1,,,	*SET,HC(2,0,1),60,1,1,,,
*SET,ISO834(2,1,1),349.2,1,1,,,	*SET,ELEXT(2,1,1),346.2,1,1,,,	*SET,HC(2,1,1),743.1,1,1,,,
*SET,ISO834(3,0,1),120,1,1,,,	*SET,ELEXT(3,0,1),120,1,1,,,	*SET,HC(3,0,1),120,1,1,,,
*SET,ISO834(3,1,1),444.5,1,1,,,	*SET,ELEXT(3,1,1),440.8,1,1,,,	*SET,HC(3,1,1),843.8,1,1,,,
*SET,ISO834(4,0,1),180,1,1,,,	*SET,ELEXT(4,0,1),180,1,1,,,	*SET,HC(4,0,1),180,1,1,,,
*SET,ISO834(4,1,1),502.3,1,1,,,	*SET,ELEXT(4,1,1),506.4,1,1,,,	*SET,HC(4,1,1),886.9,1,1,,,
*SET,ISO834(5,0,1),240,1,1,,,	*SET,ELEXT(5,0,1),240,1,1,,,	*SET,HC(5,0,1),240,1,1,,,
*SET,ISO834(5,1,1),543.9,1,1,,,	*SET,ELEXT(5,1,1),553.9,1,1,,,	*SET,HC(5,1,1),919.9,1,1,,,
*SET,ISO834(6,0,1),300,1,1,,,	*SET,ELEXT(6,0,1),300,1,1,,,	*SET,HC(6,0,1),300,1,1,,,
*SET,ISO834(6,1,1),576.4,1,1,,,	*SET,ELEXT(6,1,1),588.6,1,1,,,	*SET,HC(6,1,1),947.7,1,1,,,
*SET,ISO834(7,0,1),360,1,1,,,	*SET,ELEXT(7,0,1),360,1,1,,,	*SET,HC(7,0,1),360,1,1,,,
*SET,ISO834(7,1,1),603.1,1,1,,,	*SET,ELEXT(7,1,1),613.5,1,1,,,	*SET,HC(7,1,1),971.1,1,1,,,
*SET,ISO834(8,0,1),420,1,1,,,	*SET,ELEXT(8,0,1),420,1,1,,,	*SET,HC(8,0,1),420,1,1,,,
*SET,ISO834(8,1,1),625.8,1,1,,,	*SET,ELEXT(8,1,1),631.7,1,1,,,	*SET,HC(8,1,1),990.9,1,1,,,
*SET,ISO834(9,0,1),480,1,1,,,	*SET,ELEXT(9,0,1),480,1,1,,,	*SET,HC(9,0,1),480,1,1,,,
*SET,ISO834(9,1,1),645.5,1,1,,,	*SET,ELEXT(9,1,1),644.9,1,1,,,	*SET,HC(9,1,1),1007.7,1,1,,,
...
*SET,ISO834(55,0,1),3240,1,1,,,	*SET,ELEXT(55,0,1),3240,1,1,,,	*SET,HC(55,0,1),3240,1,1,,,
*SET,ISO834(55,1,1),929.6,1,1,,,	*SET,ELEXT(55,1,1),680,1,1,,,	*SET,HC(55,1,1),1099.9,1,1,,,
*SET,ISO834(56,0,1),3300,1,1,,,	*SET,ELEXT(56,0,1),3300,1,1,,,	*SET,HC(56,0,1),3300,1,1,,,
*SET,ISO834(56,1,1),932.3,1,1,,,	*SET,ELEXT(56,1,1),680,1,1,,,	*SET,HC(56,1,1),1099.9,1,1,,,
*SET,ISO834(57,0,1),3360,1,1,,,	*SET,ELEXT(57,0,1),3360,1,1,,,	*SET,HC(57,0,1),3360,1,1,,,
*SET,ISO834(57,1,1),935.0,1,1,,,	*SET,ELEXT(57,1,1),680,1,1,,,	*SET,HC(57,1,1),1099.9,1,1,,,
*SET,ISO834(58,0,1),3420,1,1,,,	*SET,ELEXT(58,0,1),3420,1,1,,,	*SET,HIDROC(58,0,1),3420,1,1,,,
*SET,ISO834(58,1,1),937.7,1,1,,,	*SET,ELEXT(58,1,1),680,1,1,,,	*SET,HC(58,1,1),1099.9,1,1,,,
*SET,ISO834(59,0,1),3480,1,1,,,	*SET,ELEXT(59,0,1),3480,1,1,,,	*SET,HIDROC(59,0,1),3480,1,1,,,
*SET,ISO834(59,1,1),940.3,1,1,,,	*SET,ELEXT(59,1,1),680,1,1,,,	*SET,HC(59,1,1),1099.9,1,1,,,
*SET,ISO834(60,0,1),3540,1,1,,,	*SET,ELEXT(60,0,1),3540,1,1,,,	*SET,HC(60,0,1),3540,1,1,,,
*SET,ISO834(60,1,1),942.8,1,1,,,	*SET,ELEXT(60,1,1),680,1,1,,,	*SET,HC(60,1,1),1099.9,1,1,,,
*SET,ISO834(61,0,1),3600,1,1,,,	*SET,ELEXT(61,0,1),3600,1,1,,,	*SET,HC(61,0,1),3600,1,1,,,
*SET,ISO834(61,1,1),945.3,1,1,,,	*SET,ELEXT(61,1,1),680,1,1,,,	*SET,HC(61,1,1),1099.9,1,1,,,